

30.6 с3415689

Н 54

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

6
ТОМ

НАЦИОНАЛЬНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

СПРАВОЧНИК

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*Справочник в 7 томах
под редакцией чл.-корр. РАН
В.В. КЛЮЕВА*

Том 6

В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Книга 1

В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Книга 2

В.И. Матвеев

РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

Книга 3



МОСКВА “МАШИНОСТРОЕНИЕ” 2004

Н 54 **Не разрушающий контроль:** Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: **Магнитные методы контроля.** /В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Кн. 2: **Оптический контроль.** /В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Кн. 3: **Радиоволновой контроль.** /В.И. Матвеев. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.: ил.

В первой книге рассмотрены физические основы магнитного неразрушающего контроля, методы и средства магнитной дефектоскопии и структуроскопии, примеры взаимосвязи между магнитными параметрами и механическими характеристиками ферромагнитных металлов, применение для технической диагностики усталостных явлений и оценка остаточного ресурса. Обобщены результаты исследований закономерностей изменения магнитных, электрических и механических свойств сталей при вариации температуры отжига, закалки и отпуска. Проанализированы возможности использования магнитных характеристик для контроля качества закалки и отпуска, поверхностного упрочнения и оценки напряженного состояния изделий из сталей. Приведены результаты исследований контроля прочностных и пластических свойств сталей, а также приборы магнитного неразрушающего контроля.

Во второй книге рассмотрены структурные схемы, элементная база и алгоритмы обработки дефектоскопической информации в автоматизированных системах оптического неразрушающего контроля. Описаны методы контроля микрообъектов и средства эндоскопии, системы размерного контроля и структуроскопии. Особое внимание уделено перспективным направлениям оптической дефектоскопии с применением лазерной техники, голографических технологий контроля, средств комплексной диагностики объектов. Приведены примеры реализации средств оптического контроля и диагностики в ведущих отраслях промышленности.

В третьей книге изложены основы и области применения радиоволнового контроля, рассмотрены методы контроля, элементы техники СВЧ, типовые схемы построения преобразователей и приборов. Для каждого из радиоволновых методов даны особенности технической реализации с примерами конкретных применений. Приведены национальные стандарты по радиоволновым методам и приборам, программы обучения и аттестации, перечни вопросов для сдачи квалификационных экзаменов.

Для специалистов промышленности, работников служб контроля, эксплуатации и ремонта, а также для специалистов, обслуживающих медицинскую и таможенную технику, может быть полезен преподавателям и студентам вузов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Книга 1. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

(В.В. Клюев, В.Ф. Мужижский,
Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин)

ВВЕДЕНИЕ 13

**Часть 1. МАГНИТНАЯ ДЕ-
ФЕКТОСКОПИЯ** 19

**Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОС-
НОВЫ МАГНИТНЫХ
МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ** 19

1.1. Феноменологическое
описание магнитных яв-
лений 19

1.2. Основные понятия 26

1.3. Магнитные свойства
веществ 29

1.4. Ферромагнетики. При-
рода ферромагнетизма 30

**Глава 2. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ
РАССЕЯНИЯ ДЕФЕК-
ТОВ** 40

**Глава 3. ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕ-
ОБРАЗОВАТЕЛИ МАГ-
НИТНЫХ ПОЛЕЙ** 45

3.1. Общие сведения 45

3.2. Индукционные преоб-
разователи магнитных по-
лей 46

3.2.1. Пассивные индук-
ционные преобразователи 46

3.2.2. Магнитоиндукцион-
ные преобразователи 49

3.3. Гальваномагнитные
преобразователи 50

3.3.1. Гальваномагнитные
преобразователи, основан-
ные на эффекте Холла и
эффекте Гаусса 50

3.3.2. Гальваномагнитно-
рекомбинационные пре-
образователи 54

3.3.3. Полупроводниковые
преобразователи на основе
магнитодиодного эффекта 55

3.3.4. Магнитодиоды 56

3.3.5. Магнитотранзисто-
ры 57

3.3.6. Полевые магнито-
транзисторы 58

3.3.7. z-Элементы 58

3.3.8. Тонкопленочные
магниторезисторы 59

3.3.9. Магниторезисторы с
гигантским магниторези-
стивным эффектом 62

3.3.10. Феррозондовые пре-
образователи магнитных
полей 63

3.3.11. Однообмоточные
феррозонды 64

**Глава 4. МАГНИТНЫЕ ТОЛ-
ЩИНОМЕРЫ** 67

**Глава 5. ФЕРРОЗОНДОВЫЙ
МЕТОД ДЕФЕКТОСКО-
ПИИ** 73

5.1. Общие сведения 73

5.2. Двухэлементный фер-
розонд 73

5.3. Аналитические расчеты 75

5.4. Матричные преобразователи	77	9.1.1. Выделение поперечных сварных швов	101
5.5. Техника феррозондовой дефектоскопии	78	9.1.2. Сокращение объема обрабатываемой информации	101
5.5.1. Техника применения феррозондов	78	9.1.3. Слияние точек	101
5.5.2. Контроль цилиндрических объектов	80	9.1.4. Устранение технологических элементов трубопроводов, магнитных маяков и спиральных сварных швов	101
5.5.3. Феррозондовые приборы	82	9.2. Объемно-шовный дефектоскоп для магнитного контроля качества нефтегазопроводных электросварных труб в технологическом потоке	105
Глава 6. МАГНИТОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ	84	9.3. Неразрушающий контроль сварных швов качества нефтегазопроводных электросварных труб	107
6.1. Общие сведения	84	Глава 10. ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ	110
6.2. Запись на ленту	85	10.1. Поперечная тангенциальная составляющая магнитного поля	110
6.3. Запись в приложенном поле	87	10.2. Двухчастотный метод дефектоскопии поверхностей сложной формы	115
6.4. Магнитные ленты	89	10.3. Намагничивающая система	117
6.5. Магнитографические дефектоскопы	89	10.4. Фазочувствительный электромагнитный метод ..	117
Глава 7. ИНДУКЦИОННЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ	93	10.5. Приборы для обнаружения усталостных трещин на поверхностях сложной формы	120
Глава 8. МАГНИТНЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СТенок ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ	96		
Глава 9. МАГНИТНЫЕ СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ И ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ...	99		
9.1. Внутритрубные магнитные дефектоскопы-снаряды	99		

10.5.1. Прибор для обнаружения трещин в резьбах с токовой намагничивающей системой	122
10.5.2. Бесконтактный электромагнитный дефектоскоп резьбовых деталей	123
10.5.3. Дефектоскопы зубчатых колес главных судовых редукторов	125
10.5.4. Базовые магнитные дефектоскопы	127
10.6. Техническая диагностика текущего состояния высоконагруженных резьбовых соединений	130

Часть 2. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ

Глава 11. ВЗАИМОСВЯЗЬ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СО СТРУКТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

11.1. Влияние структурных факторов на процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков	137
11.1.1. Причины магнитного гистерезиса	138
11.1.2. Влияние напряжений на процессы перемагничивания	140
11.1.3. Влияние включений и концентрационных неоднородностей на процессы перемагничивания ..	141

11.2. Физические свойства основных структурных составляющих стали	145
11.3. Взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами	148

Глава 12. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

12.1. Отжиг сталей	150
12.2. Нормализация	153
12.3. Закалка сталей	153
12.3.1. Доэвтектоидные углеродистые и низколегированные конструкционные стали	156
12.3.2. Конструкционные углеродистые качественные стали	157
12.3.3. Конструкционные легированные стали	159
12.3.4. Рессорно-пружинные стали	164
12.3.5. Заэвтектоидные углеродистые и легированные стали	166
12.3.6. Высоколегированные стали	170
12.3.7. Мартенситно-стабилизирующие и аустенитно-мартенситные стали специального назначения	173

12.3.8. Особенности изменения намагниченности насыщения при закалке стали в интервале температур $A_{c1} - A_{c3}$	176	13.1. Анализ устойчивости магнитных состояний ферромагнетиков	205
12.3.9. Магнитный структурный анализ закаленных изделий	176	13.1.1. Структуроскопия сталей на основе анализа устойчивости их магнитных состояний к действию постоянных и переменных магнитных полей	206
12.4. Отпуск сталей	178	13.1.2. Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий с различной структурой к действию упругих напряжений	218
12.4.1. Структурно-фазовые изменения при отпуске закаленных сталей	178	13.1.3. Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий к воздействию температуры	222
12.4.2. Низкоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода до 0,3 %	182	Глава 14. ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ	228
12.4.3. Среднеуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,3 ... 0,4 %	185	14.1. Коэрцитиметрические приборы	228
12.4.4. Средне-, высокоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода более 0,4 %	187	14.2. Приборы НК по измерению остаточной индукции	233
12.4.5. Высоколегированные стали	192	14.3. Приборы НК по измерению остаточной индукции частично размагнитного состояния	239
12.4.6. Мартенситно-старяющие, аустенитно-мартенситные и ферритно-аустенитные стали специального назначения	197		
12.4.7. Магнитный структурный анализ закаленных и отпущенных изделий	202		
Глава 13. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	205		

Глава 15. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ	247	17.1. Физические основы метода эффекта Баркгаузена, проблемы и перспективы его использования для контроля механических напряжений	287
15.1. Структура и физико-механические свойства слоев, упрочненных различными способами	247	17.2. Модели формирования магнитных шумов и определение основных информационных параметров контроля	291
15.2. Контроль качества поверхностного упрочнения изделий	253	17.2.1. Базовая модель приборов серии АФС	291
Глава 16. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА	270	17.3. Первичные преобразователи магнитно-акустических шумов и исследование режимов их работы	294
16.1. Магнитные характеристики, используемые в фазовом магнитном анализе	270	17.4. Средства контроля механических напряжений	299
16.2. Методы фазового магнитного анализа	271	17.4.1. Эксперимент и оборудование	299
16.3. Качественный и количественный фазовый анализ сталей	271	17.4.2. Связь параметров огибающей сигналов магнитных шумов с уровнем микронапряжений	303
16.4. Определение количества остаточного аустенита в ферромагнитных изделиях	278	17.4.3. Зависимость параметров магнитных и магнитно-акустических шумов от уровня макронапряжений	305
2.6.5. Контроль структуры и пористости изделий порошковой металлургии ...	283	17.4.4. Исследование влияния поверхностного пластического деформирования на параметры магнитных шумов	310
Глава 17. МЕТОД ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ	287	17.4.5. Сравнительный анализ параметров магнитных и магнитно-акустических шумов и разработка алгоритмов на основе их совместного использования	320

Глава 18. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ..	323		
18.1. Кристаллографическая текстура и ее влияние на свойства материалов ...	323		
18.1.1. Текстура и анизотропия свойств	325		
18.1.2. Методы определения структуры	328		
18.2. Магнитный текстурный анализ	329		
18.2.1. Метод Акулова–Брюхатова	329		
18.2.2. Определение текстуры по кривым крутящего момента	331		
18.3. Устройства для реализации магнитного метода определения текстуры ..	332		
18.3.1. Анизометры для измерения механического момента	332		
18.3.2. Анизометры для измерения нормальной составляющей вектора намагниченности	333		
18.3.3. Магнитные текстурометры	333		
18.4. Первичные электромагнитные преобразователи, используемые при определении текстуры и анизотропии магнитных свойств	339		
18.4.1. Преобразователи с П-образным магнитопроводом	339		
		18.4.2. Преобразователи с С-образным магнитопроводом	341
		18.4.3. Преобразователи с Т-образным, стержневым и сложным магнитопроводами	341
		18.4.4. Вихретоковые датчики магнитной анизотропии	343
		18.4.5. Динамически вращающиеся преобразователи	343
		Глава 19. МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТАХ	346
		19.1. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей	346
		19.2. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением	350
		СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	358
		Приложения	359
		1. Национальные и международные стандарты по сертификации специалистов по магнитному контролю.....	359
		2. Требования к техническим знаниям персонала неразрушающего контроля. Магнитный контроль...	368

Книга 2. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

(В.Н. Филинов, А.А. Кеткович,
М.В. Филинов)

ПРЕДИСЛОВИЕ 376

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ОНК) 378

1.1. Основы физической оптики 378

1.2. Фотометрическая аппаратура 386

1.3. Методы измерения оптических параметров ... 389

1.3.1. Измерение коэффициента отражения 389

1.3.2. Измерение коэффициента поглощения 392

1.3.3. Измерение коэффициента рассеяния 393

1.3.4. Измерение коэффициента пропускания 394

1.3.5. Измерение показателя преломления 395

1.3.6. Измерение коэффициента излучения 399

1.4. Основы геометрической оптики 400

Глава 2. СТРУКТУРА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ ОНК 407

2.1. Структура автоматической системы ОНК 407

2.2. Источники оптического излучения 410

2.2.1. Тепловые излучатели 412

2.2.2. Разрядные лампы 413

2.2.3. Светоизлучающие диоды 414

2.2.4. Источники света с радиоактивными изотопами 415

2.2.5. Лазерные источники излучения 416

2.3. Приемники излучения 418

2.3.1. Интегральные приемники излучения 418

2.3.2. Дифференциальные приемники излучения 423

2.4. Оптические системы ОНК 425

2.5. Компьютерные технологии обработки дефектоскопических изображений 438

2.5.1. Алгоритмы предварительной обработки изображений 438

2.5.2. Сегментация и морфометрический анализ изображений 440

Глава 3. СРЕДСТВА ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МИКРООБЪЕКТОВ 444

3.1. Основные характеристики микроскопов 444

3.2. Объективы и окуляры микроскопов 447

3.3. Методы освещения объектов контроля 448

3.4. Фазово-контрастные и интерференционные методы в микроскопии 452

3.5. Микропроекция и микрофотография	453	6.3. Спектральные методы оптической структуроскопии	517
3.6. Классификация методик	454	6.4. Оптическая металлография	520
Глава 4. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ	465	Глава 7. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ	524
4.1. Контроль с помощью жестких оптических средств на базе линзовой оптики	465	7.1. Оптико-механические приборы	524
4.2. Контроль с помощью гибких оптических средств	472	7.2. Телевизионные системы	526
4.3. Фотоэндоскопы	476	7.3. Лазерные измерители размеров	530
4.4. Телевизионные эндоскопы	477	7.4. Световодные датчики перемещения	537
Глава 5. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ (ГНК)	482	7.5. Средства оптической толщинометрии	539
5.1. Методы и аппаратура оптической голографии ...	482	7.6. Методы и приборы контроля профиля и формы изделий	540
5.2. Голографическое оборудование	493	7.7. Приборы контроля микрогеометрии изделий ..	548
5.3. Методы получения голографических интерферограмм	497	Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	556
Глава 6. ПРИБОРЫ ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ	510	8.1. Оптический контроль в авиационной технике	556
6.1. Определение внутренних напряжений в материалах	510	8.1.1. Эндоскопический контроль газотурбинных двигателей и ракетных систем	556
6.2. Методы анализа структуры прозрачных объектов	513	8.1.2. Оптический контроль формы лопаток ГТД	562

8.1.3. Применение оптико-механических приборов при производстве летательных аппаратов	565	8.6.3. Видеодиагностика светодиодов и ВОЛС	652
8.2. Оптический контроль в металлургии	574	8.6.4. Лазерная сканирующая микроскопия изделий электроники	656
8.2.1. Устройства контроля наличия и геометрии заготовки и раската	574	8.6.5. Перспективы совершенствования оптических методов контроля	658
8.2.2. Измерение скорости проката	580	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	664
8.2.3. Поточный контроль неплоскостности листового проката	584	Книга 3. РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ	
8.3. Оптический контроль в нефтегазовом комплексе	588	<i>(В.И. Матвеев)</i>	
8.3.1. Оптические методы контроля нефтепродуктов в процессе транспортировки	588	ПРЕДИСЛОВИЕ	666
8.3.2. Оптический контроль эпоксидных покрытий труб	611	Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОВОЛНОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	668
8.4. Оптический контроль в машиностроении	614	1.1. Радиоволны	668
8.4.1. Контроль полостей в собранных механизмах	614	1.2. Особенности радиоволн СВЧ-диапазона	669
8.4.2. Лазерные методы контроля в машиностроении	616	1.3. Источники и приемники радиоволнового излучения СВЧ, элементы техники СВЧ	675
8.5. Применение ОНК в судостроении	628	1.4. Взаимодействие радиоволн с диэлектрическим слоем	694
8.6. Оптический контроль в микроэлектронике	637	1.5. Рассеяние радиоволн ..	698
8.6.1. Контроль полупроводниковых материалов ...	637	Глава 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ	701
8.6.2. Контроль дефектов поверхности пластин	643		

2.1. Классификация методов и основные области применения	701	2.5. Контроль динамических процессов (смещения, уровня, скорости, ускорения, вибраций)	762
2.2. СВЧ-толщинометрия	702	2.6. СВЧ-томография	766
2.2.1. Геометрический метод	702	Глава 3. БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ РАДИОВОЛНАМИ СВЧ	771
2.2.2. Амплитудно-фазовый метод	705	3.1. Общие положения	771
2.2.3. Частотно-фазовый метод	709	3.2. Защита от радиоволнового излучения	772
2.2.4. Метод радиоволновой эллипсометрии	711	3.3. Методы контроля СВЧ-излучения	774
2.3. СВЧ-дефектоскопия и структуроскопия	712	Глава 4. СТАНДАРТЫ В РАДИОВОЛНОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ	775
2.3.1. Структурные неоднородности и дефекты	712	Приложения	777
2.3.2. Дефектоскопы на прохождение	714	1. Измерение мощности СВЧ-излучения	777
2.3.3. Дефектоскопы на отражение	715	2. Измерение частоты СВЧ-излучения	778
2.3.4. Структуроскопы ...	721	3. Измерение параметров элементов СВЧ-трактов	780
2.3.5. Радиоинтроскопы ...	724	4. Требования к техническим знаниям персонала, работающего в области неразрушающего контроля по радиоволновому методу I, II, III уровней квалификации	784
2.4. Контроль физико-механических и технологических параметров	732	5. Рекомендуемые экзаменационные вопросы по радиоволновому методу контроля	792
2.4.1. Измерение диэлектрических характеристик материалов	732	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	827
2.4.2. Контроль плотности	737		
2.4.3. Контроль влажности	742		
2.4.4. Контроль технологических параметров (вязкости, отвердевания, вулканизации, гомогенности и т.п.)	748		
2.4.5. Контроль давления, усилия, деформации	755		
2.4.6. Резонансные СВЧ-методы неразрушающего контроля	759		

Книга 1

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные методы используют для контроля размеров, нарушений сплошности, структуроскопии и определения фазового состава ферромагнитных материалов. Еще в XIX в. магнитные методы контроля впервые применили для оценки структурного состояния материалов и прочностных характеристик изделий – корпусов разрывных снарядов, ружейных затворов, ружейных и артиллерийских стволов. На Тульском Императорском военном и Златоустовском горно-металлургическом заводах для контроля использовали магнитную установку – электромагнитный баланс. Уже первые попытки введения такого контроля на Тульском заводе позволили выявить до 65 % бракованных стволов ружей. В 1902 г. на съезде металлургов Урала обсуждался опыт положительного применения магнитного метода для контроля структуры и свойств металла.

В 1927 г. изобретатель Ф.М. Карпов разработал дефектоскоп-электромагнит для контроля осей и колесных пар вагонов.

В 1930-х годах Н.С. Акулов, Р.И. Янус, М.Н. Михеев начали формировать новое научное направление – магнитный структурно-фазовый анализ сталей и сплавов.

В 1937 г. в Москве прошла первая конференция по магнитному структурному анализу. В 1931–1934 гг. Н.С. Акулов создал приборы для контроля структуры и фазового состава сталей. В те же годы начали применять в качестве параметра контроля структурного состояния коэрцитив-

ную силу. М.Н. Михеев создал универсальный переносной коэрцитиметр для локального контроля структуры и твердости проката и изделий машиностроения, который в различных модификациях используется до настоящего времени.

В 1932 г. Р.И. Янус разработал магнитный метод контроля электротехнической стали, что позволило перейти от выборочного контроля к сплошному контролю магнитных характеристик этой стали.

В 1936 г. на основе работ Ф.М. Карпова была изготовлена и введена в эксплуатацию дефектоскопическая станция, которую устанавливали на специальных вагонах и дрезинах. В качестве намагничивающего устройства использовали магнит, перемещающийся над рельсом. Магниточувствительным элементом служило электромеханическое устройство, реализующее пондеромоторный метод. Усовершенствовал пондеромоторный метод контроля рельсов Р.И. Янус. Одновременно П.А. Халилеев разработал индукционные чувствительные элементы, которые позволили увеличить скорость станций (вагонов-дефектоскопов) до 60 км/ч.

В.К. Аркадьев опубликовал основополагающую статью "О развитии теоретических основ магнитной дефектоскопии" (Изв. АН СССР. 1937. № 2), где он впервые показал, что действие дефекта эквивалентно действию диполя, имеющего момент, аналогичный моменту дефекта, и расположенного в центре него, а также сформулировал основные задачи магнитной дефектоскопии.

В 1938 г. С.В. Вонсовский изложил теоретические основы магнитной дефектоскопии в статье "Простейшие расчеты теоретических основ магнитной дефектоскопии".

В 1939 г., после серии предварительных исследований и натурных опытов, были внедрены индукционные дефектоскопические тележки для контроля рельсов, уложенных в пути (А.Б. Сапожников, Н.В. Мирошин, Б.П. Кашкин, П.Н. Большаков, Н.М. Шилов; коллектив мастеров Сибирского физико-технического института).

С 1941 г. на всех железнодорожных путях Советского Союза начали успешно применять дефектоскопические тележки с постоянным магнитным полем, позволяющие обнаруживать скрытые трещины в рельсах (ЦНИИ, А.Н. Матвеев, И.М. Лысенко).

Первая монография по магнитной дефектоскопии была написана Р.И. Янусом и вышла в 1946 г. Она обобщила многолетний опыт российских исследователей и самого автора в области магнитных методов контроля нарушений сплошности и структуроскопии. Р.И. Янус установил, что дефект аналогичен магниту, эффективная длина которого в слабом поле может значительно превышать истинную длину дефекта вдоль поля, а поперечное сечение несколько сжато.

Р.И. Янус пришел к важному выводу о том, что выявляемость внутренних дефектов сильно зависит от напряженности приложенного поля. По мере приближения его к насыщению напряженность поля дефекта повышается с нарастающей крутизной.

Этот ученый был крупнейшим и наиболее авторитетным специалистом по магнитным методам производственного контроля. В его монографии "Магнитная дефектоскопия" приведено полное научное описание теории и практики магнитной дефектоскопии; дано научное обобщение наиболее важных и общих вопро-

сов физики магнитных измерений в применении к проблемам дефектоскопии; указано, какие магнитные характеристики и в каких случаях следует использовать при дефектоскопии, какие методы измерений магнитных характеристик наиболее целесообразно применять; изложены основные принципы построения дефектоскопов различных типов.

В 1952 г. П.А. Халилеев и В.В. Власов создали индукционные искатели с возможностью записи снимаемых с них сигналов на киноленту. Эти приборы широко применяли в вагонах-дефектоскопах для контроля рельсов.

В 1952 г. К.С. Маховер и К.В. Усенко во Всесоюзном научно-исследовательском институте строительства магистральных трубопроводов (ВНИИСТ) разработали магнитографический метод. Исследованием и совершенствованием этого метода контроля занимались в МВТУ им. Баумана, АН БССР, Шосткинском филиале НИКФИ, СКБ "Газприборавтоматика", на предприятии "Ростовэнергоремонт", в Белорусском политехническом институте, Институте физики металла УрО РАН, на Калининградском экспериментальном заводе. Именно в СССР он получил путевку в жизнь благодаря работам А.С. Фалькевича и М.Х. Хусанова. В дальнейшем исследования в области оптимизации метода продолжили В.С. Козлов, Ю.Б. Фещенко, А.М. Шарова, Ю.Ш. Голант, А.Е. Новиков, В.Е. Щербинин, М.Л. Шур, С.П. Михайлов, Л.А. Кашуба, О.А. Жолнерович.

Метод совершенствовали в направлении развития намагничивающих устройств, дефектоскопов и лент в рамках классического метода, в направлении изменения самих контрольных операций в целях расширения области использования метода, а также методов записи информации.

Ю.Б. Фещенко предложил магнитный контроль с записью полей дефектов на носитель, скользящий относительно изделия, в отличие от основного метода контроля с записью на неподвижный носитель.

Научный и практический интерес представляет оптимизация процесса записи поля дефекта на ленту. А.С. Фалькевич и М.Х. Хусанов, а затем Л.А. Кашуба дали графоаналитическое объяснение процесса магнитной записи поля дефекта.

Первый шаг в выявляемости локальных дефектов был сделан в 1970 г. Л.А. Кашубой и В.В. Костиным, которые экспериментально установили, что обусловленное дефектом поле принимает параметры, соответствующие протяженному дефекту.

В 1953 г. под руководством А.С. Фалькевича были созданы первые магнитографические дефектоскопы для контроля сварных соединений.

В 1959 г. предложена конструкция дефектоскопа МД-9 с вращающейся магнитной головкой (МГ). Эта схема сканирующего устройства находит применение во всех последующих приборах.

В 1950-х годах для контроля рельсов широко использовали скоростные вагоны-дефектоскопы (В.В. Власов, А.И. Воробьев, Е.П. Успенский) с применением "сплошного" осциллографирования индукционных сигналов, исходящих от обследуемых рельсов.

Большой вклад в их совершенствование внесли сотрудники Томского государственного университета (ТГУ) и Сибирского физико-технического института (СФТИ): В.Н. Кессених, Н.М. Шилов, Б.П. Кашкин, П.Н. Большаков, В.И. Иванчиков, В.Ф. Ивлев. Их работы продолжили Н.В. Мирошин, В.С. Семенов, А.С. Кузнецов. Активным участником в работах по теории электромагнитных методов контроля был Г.А. Бюлер (кафедра математической физики ТГУ).

Эффект, обнаруженный и изученный Н.В. Мирошиным (СФТИ), показал, что скрытый дефект в ферромагнитном изделии можно выявить с помощью дефектоскопа переменного поля, если изделие внести в достаточно сильное постоянное поле. Используя нелинейную связь ме-

жду намагничивающим полем и намагниченностью, Н.В. Мирошин предложил мостовую схему для измерения локальной намагниченности в ферромагнетике.

Разработка вопросов распределения гармонических магнитных полей в проводящих телах с дефектами, начатая В.Н. Кессенихом и продолженная Н.М. Шиловым, нашла дальнейшее развитие в исследованиях Б.П. Кашкина и особенно В.И. Иванчикова.

В.И. Иванчиков рассмотрел задачу выявляемости открытой сквозной трещины в проводящей пластине заданной конечной толщины, находящейся в поперечном однородном переменном поле.

В 1954 г. Р.И. Янус предложил феррозондовый метод дефектоскопии деталей машин и диагностики в медицине.

В 1959 г. В.В. Корсаков (ВИАМ) работал для авиапромышленности феррозондовый полюсоискатель ФП-1. В.В. Власов изучил поля рассеяния в наклепанных и ненаклепанных рельсах и установил, что на величину полей дефекта существенно влияют магнитные свойства материала вблизи поверхности изделия. Наличие у поверхности мягкого в магнитном отношении материала вызывает уменьшение поля дефекта, а жесткий материал в поверхностном слое способствует увеличению поля рассеяния от дефекта.

При изучении полей рассеяния от наружных и внутренних дефектов В.В. Власов подтвердил и развил ряд положений теории Р.И. Януса о том, что в магнито-статических условиях поле дефекта создается как поверхностными зарядами на стенках дефекта, так и объемными зарядами, обусловленными магнитной нелинейностью изделия в ближайших к дефекту участках металла. При величинах намагничивающих полей, намного превышающих поле, соответствующее максимальной магнитной проницаемости, объемные заряды усиливают поле дефекта; при меньших полях наличие объемных зарядов может даже уменьшить поле дефекта.

Развивая идеи Р.И. Януса и А.Б. Сапожникова, Р.Е. Ершов решил задачу об определении возмущения поля ферромагнитной среды, производимого дефектом типа поперечной трещины, при нелинейности магнитных свойств ферромагнитной среды в области средних и сильных магнитных полей.

Н.Н. Зацепин и В.Е. Щербинин детально рассмотрели особенности составляющих магнитного поля различных поверхностных дефектов. В 1960 г. Н.Н. Зацепин и В.Е. Щербинин разработали феррозондовый метод контроля сварных швов, теоретические основы феррозондовой толщинометрии, метод расчета поля дефекта в трехмерном пространстве.

В 1965–1970 гг. Н.С. Акулов, В.С. Козлов, А.М. Шарова, А.Е. Новиков, М.Г. Хусанов, Е.А. Бутузов, В.М. Карпов, Л.А. Кашуба решили кардинальные проблемы теории и практики магнитографического контроля. Сотрудниками НИИ интроскопии были созданы и внедрены на Первоуральском Новотрубном заводе, Магнитогорском металлургическом комбинате, Ждановском металлургическом заводе для поточного производства горячекатаных труб и холоднокатаных листов дефектоскопические автоматические установки ДФ-1, УПН-3, "Лист-4", УРКТ и др. (П.К. Ощепков, В.В. Ключев, Л.А. Хватов, Е.Я. Симонова, О.С. Семенов, Ю.С. Калинин, В.П. Курозаев и др.)

В 1970–1988 гг. в НИИ интроскопии (МНПО "Спектр") разработали и серийно выпускали магнитные толщинометры (МИП-10, МТ-50Н), магнитные дефектоскопы резьбовых соединений (МД-3М, МД-40К, МД-42К), магнитометры (МФ-32 КЦ), ферритометры и т.п. (В.В. Ключев, А.П. Дегтерев, В.Ф. Мужижкий, В.П. Курозаев, В.П. Есилевский, А.Г. Пеликан и др.). В тот период дефектоскописты (НИИЭРАТ) совместно с металловедрами выполнили большой объем исследований в целях установления причин отказов агрегатов и энергетических установок при-

мерно на 10 типах ракетно-космических объектов, благодаря чему были внесены изменения в их конструкцию. В результате консультаций и изучения процессов контроля в 1980-е годы была переработана технологическая документация по дефектоскопии и значительно повышена эффективность контроля в организациях ракетно-космической отрасли, в том числе в НИИ им. С.П. Королева, НПО "Энергия", Теплотехническом институте им. Ф.Э. Дзержинского, НПО "Электроугли", НПО "ТЕХНОМАШ". На базе НИИЭРАТ прошли переобучение многие специалисты из этих организаций. Дефектоскописты НИИЭРАТ участвовали в наиболее сложных исследованиях причин катастроф самолетов гражданской авиации.

В АН СССР Н.С. Акуловым, Р.И. Янусом и М.Н. Михеевым были заложены основы практического использования магнитных методов контроля качества термической и химико-термической обработки изделий, текстурного анализа сталей. Начатые ими работы продолжают успешно развиваться.

М.Н. Михеев и Э.С. Горкунов обобщили результаты исследований за более чем полувекковой период изучения закономерностей изменения магнитных, электрических и механических свойств сталей разных классов при вариации температуры отжига, закалки и отпуска, что позволяет использовать эти данные при выборе параметров неразрушающего контроля и разработке методов и средств определения структурного состояния, химического и фазового составов сталей, а также прочностных характеристик материалов и изделий.

Н.С. Акулов, С.В. Вонсовский, М.Н. Михеев, Д.И. Кондорский, К.П. Белов, Я.С. Шур, Р.И. Янус, Э.С. Горкунов и В.М. Морозова получили уникальные результаты, которые позволили понять природу процессов намагничивания и перемагничивания такого гетерогенного ферромагнетика, как сталь. Работы А.С. Зай-

мовского, Б.Г. Лившица, В.С. Меськина, С.С. Штейнберга, Г.С. Корзунина, В.Д. Садовского, Г.В. Курдюмова, Б.А. Апаева, К.Н. Сироты, А.П. Гуляева, Р. Кана, Е. Беркевича, Е. Кнеллера в области физики магнитных явлений, физического металловедения и материаловедения сыграли важную роль в разработке физических основ использования магнитных свойств для оценки структурного состояния и фазового состава сталей и сплавов.

В частности, одним из важных направлений в области магнитного и фазового анализа высоколегированных сталей является магнитная ферритометрия.

Известно, что физико-механические и коррозионные свойства таких сталей во многом зависят от наличия в них ферритной фазы, поэтому ее содержание в изделиях регламентируется отраслевыми документами. Большой вклад в развитие теоретических основ и создание ферритометров внесли ЦНИИТМАШ, НИИХИММАШ, МНПО "Спектр" (С.Д. Энтин, В.П. Есильевский, Н.В. Химченко, П.Е. Меринов, П.А. Бобров, А.Г. Пеликан и др.).

В результате выполненных в 1950-е годы в НИИХИММАШ исследований были созданы локальные ферритометры пондеромоторного действия: альфа-фазометр с диапазоном измерения 0,5 ... 20 % ферритной фазы, ферритометры ФА-1 и ФА-1М с диапазоном 0,5 ... 70 %. Начиная с 1964 г. ферритометры конструкции НИИХИММАШ выпускались серийно Кишиневским заводом "Электроточприбор". В тот же период в ЦНИИТМАШ созданы электромагнитные ферритометры ФВД-2 с диапазоном измерения 10 и 20 % и ФЦ-2 для определения ферритной фазы в стандартных образцах. Применение созданных в НИИХИММАШ и ЦНИИТМАШ ферритометров рекомендовано ГОСТ 11878-66 "Сталь аустенитная. Методы определения содержания α -фазы".

В 1972 г. НИИИИИ разработал феррозондовый ферритометр МФ-10Ф. Особенностью этого прибора является возмож-

ность измерения содержания ферритной фазы в толще металла до 12 мм, в то время как для локальных ферритометров этот слой ограничивался 1 ... 2 мм. В том же году НИИИИИ создал автоматизированный ферритометр ФМ-1, решив задачу контроля сварных швов труб на трубоэлектросварочных стендах аргонодуговой сварки. В основу способа положено бесконтактное измерение относительного значения магнитной проницаемости металла шва с помощью микроферрозондового преобразователя, перемещающегося относительно изделия.

В 1990-е годы в ЦНИИТМАШ для градуирования ферритометров всех типов разработали технологию изготовления стандартных образцов ферритной фазы способом центробежного литья. Образцы прошли международные испытания и рекомендованы к использованию Международным институтом сварки.

В начале 1990-х годов в НИИХИММАШ была создана новая модель локального ферритометра АФ-4 в портативном исполнении (масса не более 400 г). Информация о содержании ферритной фазы представляется в цифровом виде и автоматически переводится на экране прибора в процентное содержание, в отличие от используемых ранее градуировочных кривых, а также в ферритное число в соответствии со стандартом ИСО 8549.

В 1976 г. по решению Государственного комитета по науке и технике СССР были начаты работы над созданием внутритрубного снаряда-дефектоскопа для контроля коррозионного состояния магистральных газопроводов с диаметром труб 1420 мм. К работе над аппаратом были привлечены Министерство приборостроения, Министерство газовой промышленности и АН СССР.

От Академии наук в работе принимал участие Институт физики металлов (ИФМ) Уральского научного центра АН СССР, от Мингазпрома – Специализиро-

ванное конструкторское бюро (СКБ) "Газ-автоматика" (Москва) и его Саратовский филиал.

В период с 1990 по 2003 гг. в МНПО "Спектр" и ЗАО "НИИИИИ МНПО "Спектр" разработаны и серийно выпускаются следующие магнитные приборы: дефектоскоп резб МД43К, магнитометр МФ23ИМ, устройства намагничивающие УНМ-300/2000, УН-5, толщинометры МТ-51НП, МТП-01, МИТ-1, МИТ-1/2, коэрцитиметр МФ32КЦ.

Необходимо отметить, что получили широкую известность справочники "Не разрушающий контроль и диагностика" и "Не разрушающий контроль. Россия 1900–2000 гг." (оба издания под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева). Однако в этих книгах информация о магнитных методах неразрушающего контроля изложена достаточно сжато.

Целью настоящего справочника является обобщение отечественных и зару-

бежных публикаций с учетом последних достижений. Авторы не претендуют на научный приоритет информации, опубликованной в известных работах, которые приведены в списке литературы, а ставят целью систематизацию информации. В книге кратко изложены основные понятия, физические и технические основы метода, новые сведения по магнитным средствам НК, которые в последнее время находят широкое применение в промышленности.

Книга состоит из двух частей: часть 1 – "Магнитная дефектоскопия" (за исключением магнитных методов магнитопорошкового контроля, опубликованных в отдельной книге), часть 2 – "Магнитная структуроскопия".

Авторы признательны д-рам техн. наук Г.С. Корзунину, А.С. Шлеенкову, В.А. Захарову, В.Н. Филинову и ряду других ученых за предоставленные материалы.

Часть I. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

1.1. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Магнитные свойства присущи всем без исключения окружающим телам. Магнетизм так же универсален, как земное притяжение и электричество. Однако не у всех тел это свойство проявляется в одинаковой степени. У подавляющего большинства тел магнитные свойства очень слабы. Можно указать два наиболее ярких проявления магнетизма.

Во-первых, это так называемые постоянные магниты, обычно изготовленные из железа или его сплавов и соединений, а также из некоторых других химических элементов – никеля, кобальта и редкоземельных элементов (лантаноидов), например гадолиния.

Во-вторых, проявление аналогичной силы можно увидеть, если взамен упомянутых постоянных магнитов взять проводники (или катушки из них – соленоиды), по которым протекает постоянный электрический ток.

Рассмотрим два постоянных магнита из одинаковых массивных железных стержней (рис. 1.1.).

Будем считать, что заштрихованный конец стержня имеет знак "+" и обозначен буквой N, а незаштрихованный конец – знак "-" и обозначен буквой S. Стержни, изображенные на рис. 1.1, направлены друг к другу одинаковыми знаками и буквами (+, N). Чтобы сблизить стержни, необходимо приложить усилия. На рис. 1.2, где стержни обращены друг к другу разными знаками и буквами (+, N и -, S), усилия направлены на то, чтобы не дать стерж-

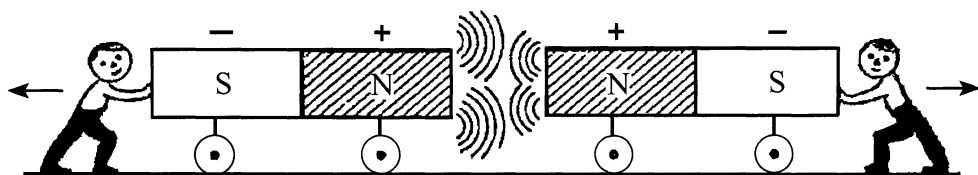


Рис. 1.1. Усилия при попытке сблизить одноименные концы постоянного магнита

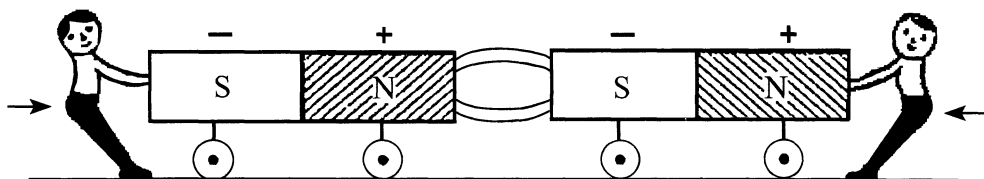


Рис. 1.2. Усилия при попытке удержать постоянные магниты, направленные друг к другу разноименными концами

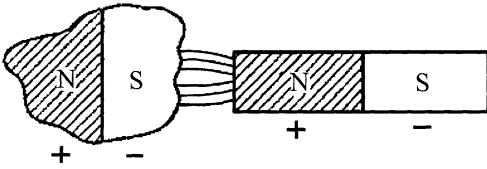


Рис. 1.3. Магнитоиндукционный эффект

жням соприкоснуться. Достаточно ослабить усилие, как в первом случае магнитные стержни разъедутся, а во втором – плотно соединятся.

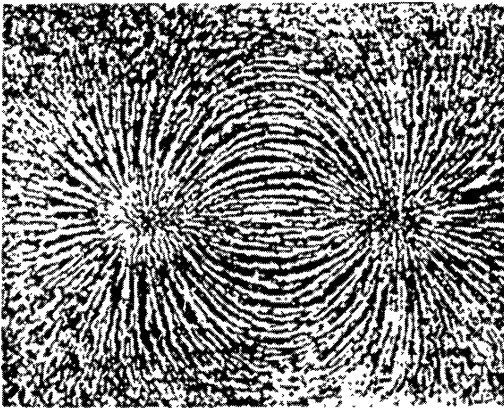
Существует еще один наглядный способ обнаружения магнитного действия постоянных магнитов. Если около магнита поместить металлическую деталь, которая до приближения к магниту не проявляла никаких магнитных действий, то вблизи постоянного магнита эта деталь сама становится магнитом. На стороне детали, обращенной к магниту, возникает состояние, при котором она всегда притягивается к магниту, подобно разноименным концам магнитных стержней (рис. 1.3).

Этот магнитоиндукционный эффект можно использовать для обнаружения в пространстве, окружающем магнит, его магнитного действия. На рис. 1.4, *а* пока-

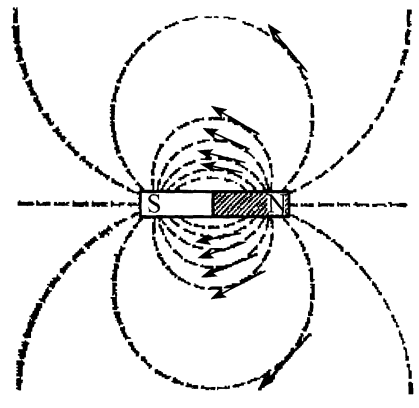
зано проявление таких магнитных действий стержневым постоянным магнитом, полученное с помощью магнитных порошков. Частицы порошка (имея несколько удлиненную форму) выстраиваются вдоль линий, которые выходят из одного конца магнита и входят в другой его конец (рис. 1.4, *б*). Их принято называть линиями индукции, или магнитными силовыми линиями, поскольку именно вдоль них направлены силы (показаны на рис. 1.4, *б* стрелками), ориентирующие частицы магнитного порошка вокруг магнита.

Напомним, что концы магнитов называют полюсами. Если вблизи магнита нет других магнитов, каких-либо больших железных предметов или залежей магнитной руды, то подвешенный магнит всегда ориентируется почти точно вдоль географического меридиана с юга на север (рис. 1.5).

Вокруг магнитов существует особая форма материи – магнитное поле. Это и есть тот материальный носитель, который передает взаимодействие между магнитами. Этот носитель передает взаимодействие и между электрическими токами.



а)



б)

Рис. 1.4. Картина линий индукции стержневого магнита, полученная с помощью магнитных порошков (*а*), и векторный характер магнитного поля (*б*)

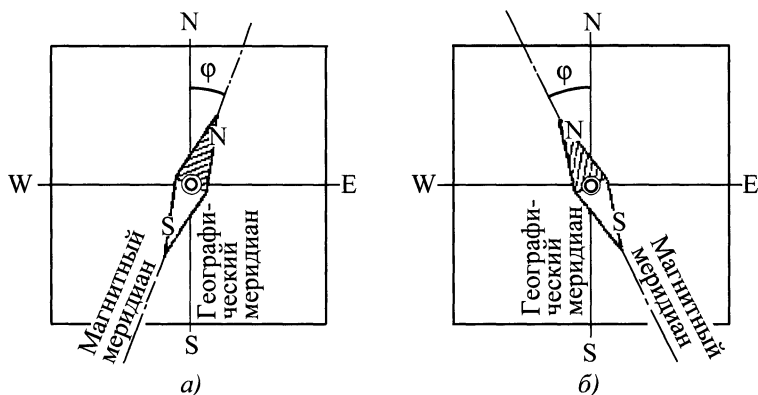


Рис. 1.5. Направление магнитной стрелки относительно географического меридиана в местах с восточным (а) и с западным (б) магнитным склонением (ϕ – угол склонения)

Существуют тела, которые могут притягиваться и отталкиваться от магнитов, не находясь при этом в непосредственном контакте с ними. Сила притяжения или отталкивания прямо пропорциональна расстоянию между магнитом и взаимодействующим с ним телом.

Некоторые тела вблизи магнита сами становятся ярко выраженными магнитами. Однако при удалении магнита они могут как сохранить, так и потерять это свойство. Сами исходные магниты также могут утратить свои магнитные свойства, например, если нагреть их выше определенной температуры, а потом охладить без присутствия других магнитов поблизости, или же подвергнуть их сильным механическим ударам. Восстановить магнитные свойства, утерянные при нагревании, можно путем охлаждения вблизи другого магнита или с помощью воздействия постоянных электрических токов, протекающих по проводам или соленоидам, а потерянные при ударах – теми же способами даже без охлаждения.

На направление стрелки компаса влияют не только магнитное поле Земли или поле постоянных магнитов, но и электрические токи (рис. 1.6). Это впервые в 1821 г. обнаружил датский физик Эрстед.

Вокруг проводника с током, как и вокруг постоянного магнита, возникает магнитное поле. Это можно подтвердить с помощью частиц магнитного порошка, которые "нарисуют" линии индукции магнитного поля электрических токов.

На рис. 1.7 приведены хорошо известные картины линий индукции магнитных полей прямого и кругового токов, а также соленоида, полученные с помощью железных опилок. Хотя эти картины и похожи на аналогичные картины для постоянных магнитов, но есть и некоторые различия.

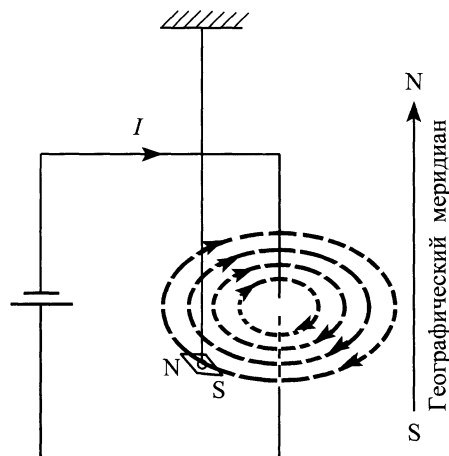


Рис. 1.6. Направление магнитной стрелки около прямого проводника с электрическим током I (открытие Эрстеда)

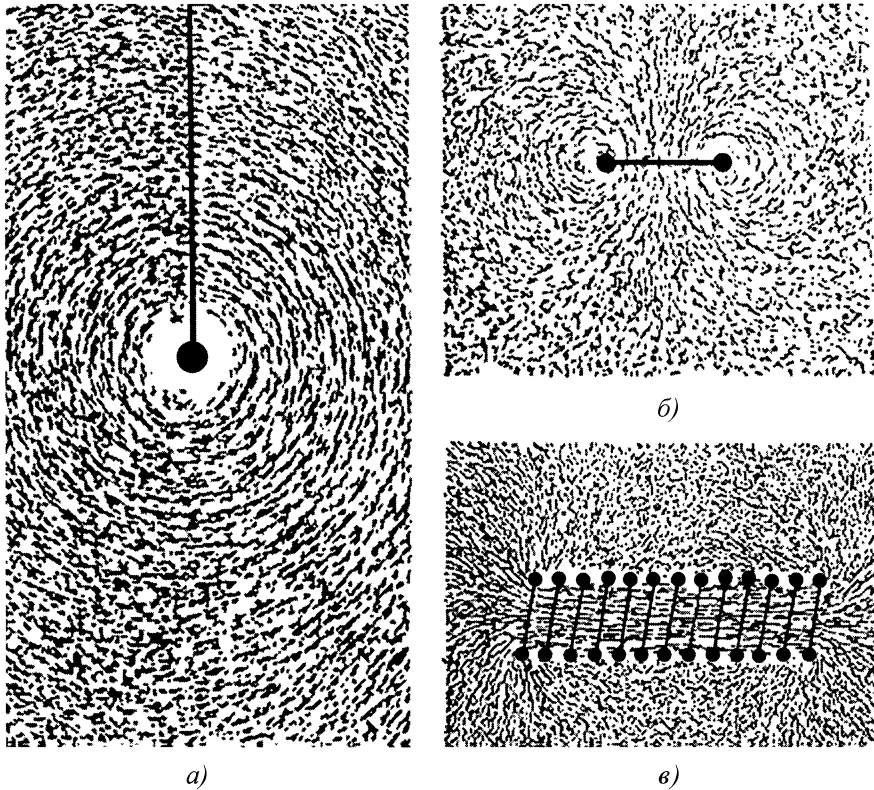


Рис. 1.7. Картины линий индукции магнитных полей, полученные с помощью магнитного порошка:

a – для прямого тока; *б* – для замкнутого кругового тока; *в* – для соленоида с током

Сравним картины линий индукции стержневого магнита и соленоида (см. рис. 1.4, *a* и рис. 1.7, *в*). Если исключить внутреннюю часть последнего, то картины поля совершенно подобны. Однако у соленоида силовые линии в отличие от магнита не имеют ни начала, ни конца – они всегда замкнуты как у прямого, так и кругового проводника.

Французский физик Ампер еще в 20-х годах XIX столетия, сразу после опытов Эрстеда, выдвинул гипотезу о молекулярных токах: электрические токи могут быть не только макроскопическими, когда они текут по большим (по сравнению с размерами атомов) проводам, но и микроскопическими, протекающими в пределах

одного атома или молекулы. Таким образом, в каждом теле имеется огромное число замкнутых молекулярных токов. Каждый из них создает вокруг себя магнитное поле, подобное полю замкнутого кругового тока (см. рис. 1.7, *б*).

В большинстве тел, когда на них не действуют никакие внешние ориентирующие силы, тепловое хаотическое движение все время меняет направление молекулярных токов, и поэтому наиболее вероятно, что в среднем магнитные поля этих токов не складываются в одно результирующее поле, а дают в сумме нулевой эффект. На рис. 1.8, *a* показано беспорядочное распределение ориентаций молекулярных токов в теле, "скрывающее"

его магнетизм. Постоянные магниты отличаются от других тел только тем, что в них по определенным причинам, которые будут рассмотрены ниже, молекулярные токи ориентированы упорядоченно – параллельно (рис. 1.8, б) и поэтому дают вполне заметный суммарный магнитный эффект во внешнем пространстве.

Если в телах нет внутренних, закрепляющих параллельную ориентацию, взаимодействий между молекулярными токами, то такая ориентация с тем или иным эффектом может быть обусловлена только влиянием внешнего магнитного поля, например поля постоянного магнита или соленоида с током.

Гипотеза Ампера о молекулярных токах сначала была лишь гениальной догадкой. Только в конце XIX – начале XX веков, когда был открыт электрон, когда была предсказана и получила опытное подтверждение ядерная структура атомов, эта гипотеза нашла полное экспериментальное и теоретическое обоснование.

Ампер дал "токовую" интерпретацию магнитным взаимодействиям. Она связана с теоремой об эквивалентности магнитных полей, создаваемых электрическими токами и постоянными магнитами (теорема Ампера).

Для формулирования этой теоремы приведем основные количественные характеристики электрических и магнитных полей. В первом случае одним из основных понятий является понятие электрического заряда q . Его можно ввести из анализа закона Кулона – закона взаимодействия точечных электрических зарядов, т.е. зарядов, линейные размеры которых малы по сравнению с расстоянием r_{12} между ними. Закон Кулона гласит, что силы F_1 и F_2 , действующие между двумя точечными зарядами q_1 и q_2 , прямо пропорциональны произведению этих зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Эти силы направлены вдоль линии, соединяющей точечные заряды q_1 и q_2 , т.е.

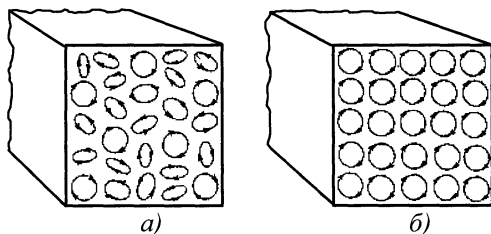


Рис. 1.8. Микроскопические (молекулярные) замкнутые токи в постоянном магните:
 а – при беспорядочном распределении (гипотеза Ампера); б – при упорядоченном распределении

$$F_1 = \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{12}; \quad F_2 = \frac{q_2 q_1}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{21}, \quad (1.1)$$

где \mathbf{e}_{12} и \mathbf{e}_{21} – единичные векторы, направленные соответственно от заряда q_2 и q_1 и от q_1 и q_2 , причем $\mathbf{e}_{12} = -\mathbf{e}_{21}$.

Направление сил определяется знаками зарядов. Заряды одинаковых знаков отталкиваются (рис. 1.9, а), разных знаков – притягиваются (рис. 1.9, б).

Если выделить в формуле (1.1) множитель q_1 (или q_2), то второй множитель в выражении для F_1 (или F_2) будет зависеть от q_2 (или q_1) и взаимного расстояния между зарядами. Его принято называть напряженностью электростатического поля, которое создает заряд q_2 (или q_1 в точке, занятой зарядом q_1 (или q_2), и обозначать символом E_1 (или E_2). Необходимо отметить, что если эти заряды одинакового знака, то силы F_1 и F_2 их расталкивают, а если они разного знака, то притягивают. Таким образом, закон Кулона можно записать в следующем виде:

$$F_1 = q_1 E_2; \quad F_2 = q_2 E_1,$$

где $E_2 = (q_2 / r_{12}^2) \mathbf{e}_{21}$ и $E_1 = (q_1 / r_{12}^2) \mathbf{e}_{12}$.

В общем случае сила, с которой электростатическое поле с напряженностью E (оно может создаваться не только одним точечным неподвижным зарядом, но и произвольной их совокупностью) действует на точечный заряд q ,

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}.$$

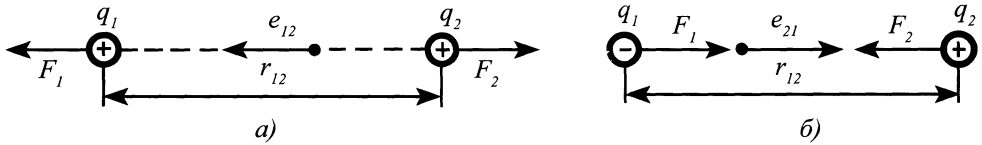


Рис. 1.9. Схемы, иллюстрирующие закон Кулона:

a – заряды q_1 и q_2 одинаковых знаков; *б* – заряды q_1 и q_2 разных знаков

Можно ли получить что-либо аналогичное для взаимодействия магнитов? Существует ли для магнитов аналог закона Кулона? В некотором смысле на эти вопросы можно ответить утвердительно. Представим постоянный магнит, например, в виде очень тонкой спицы. Одноименные концы двух таких спиц отталкиваются, а разноименные – притягиваются по такому же закону Кулона, который

сформулирован выше для точечных электрических зарядов. Только вместо электрических зарядов надо подставить некие фиктивные магнитные заряды m_1 и m_2 , а вместо напряженности электрического поля E – напряженность магнитного поля H .

Однако это лишь формальная аналогия. Дело в том, что электрические заряды обоих знаков всегда можно выделить в самостоятельные образования (в атоме водорода это, например, отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный протон). В случае магнетизма этого сделать нельзя. Никаким делением магнита невозможно получить частицы с одним единственным полюсом. Магнит – это материальный объект, всегда имеющий два полюса. Любая, даже самая малая частица магнита всегда имеет два полюса или всегда четное число полюсов.

В связи с этим было высказано предположение, что магнит – это совокупность элементарных магнитных двойных полюсов – магнитных диполей, которые только формально можно представлять состоящими из двух неразрывно связанных между собой фиктивных магнитных зарядов двух знаков (плюса и минуса) или северного (N) и южного (S) полюсов. Поэтому в качестве электрической аналогии таким двухполюсным магнитом может служить элементарный электрический диполь, представляющий собой два связанных точечных равных по модулю электрических заряда разных знаков, расположенных друг от друга на малом расстоянии l .

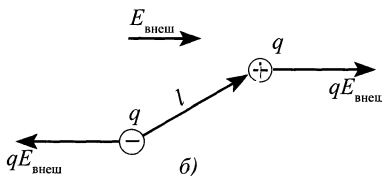
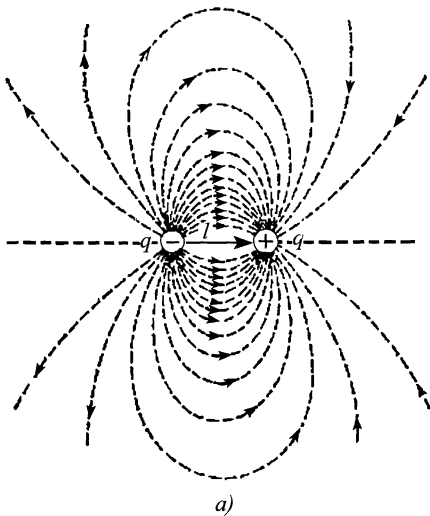


Рис. 1.10. Электрический диполь:

a – линии напряженности электрического поля;

б – поведение диполя с моментом $P = ql$ во внешнем электрическом поле напряженностью $E_{\text{внеш}}$

Из электростатики известно, что и активные свойства электрического диполя (модуль и направление создаваемого им электрического поля напряженностью E), и его пассивные действия (его поведение во внешнем электрическом поле напряженностью $E_{\text{внеш}}$) определяются электрическим моментом P . Этот электрический момент есть произведение заряда q на радиус-вектор l , который равен расстоянию l между зарядами и обычно направлен от отрицательного заряда к положительному (рис. 1.10, а):

$$P = ql.$$

При этом предполагается, что объем зарядов очень мал (опять речь идет о точечных зарядах), так что их линейными размерами можно пренебречь по сравнению с расстоянием l ; в противном случае электрический момент диполя требует более общего и сложного определения. При помещении электрического диполя во внешнее электрическое поле напряженностью $E_{\text{внеш}}$ оно всегда стремится ориентировать электрический момент P диполя вдоль своего направления (рис. 1.10, б).

После открытия Эрстеда и появления гипотезы Ампера возникла мысль получить интерпретацию магнитного момента, связать магнитный момент с током и с геометрической формой и размерами контура, по которому протекает ток. Здесь опять видно отличие магнетизма от электричества, поскольку для контура с током невозможно ввести не только "магнитные заряды", но даже магнитные полюсы так, как (хотя и формально) вводили их для постоянных магнитов. Определим сначала понятие магнитного момента по аналогии с электрическим.

Предположим, что несмотря на невозможность отделить северный полюс магнита от южного можно приписать им некоторое, как было указано выше, обладание фиктивными магнитными зарядами m (подобными электрическим). Тогда для очень маленького элементарного магнита (диполя) и его магнитный момент M_k (по

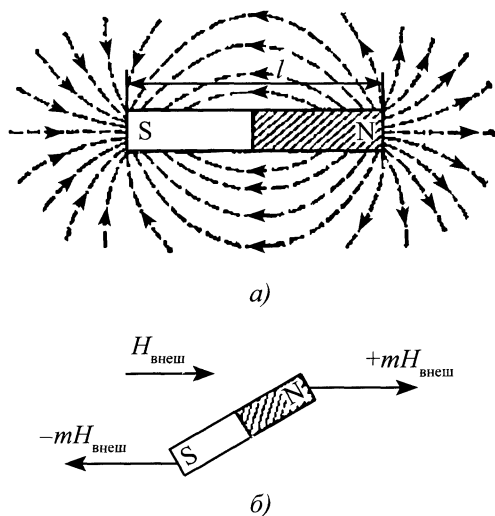


Рис. 1.11. Магнитный диполь:
 а – линии индукции магнитного поля;
 б – поведение диполя с моментом $M_k = ml$ во внешнем магнитном поле

анalogии с электрическим моментом P) можно представить в виде

$$M_k = ml,$$

где модуль радиуса-вектора l равен длине магнита и направлен от северного полюса к южному.

На рис. 1.11, а показан такой магнитный диполь, создающий вокруг себя магнитное поле напряженностью H , а рис. 1.11, б иллюстрирует его поведение во внешнем магнитном поле напряженностью $H_{\text{внеш}}$. Здесь, аналогично электрическому диполю во внешнем электрическом поле, внешнее магнитное поле стремится ориентировать магнитный момент M_k вдоль своего направления.

Из изложенного можно заключить, что основной характеристикой магнитов (как и в случае электрических диполей) следует выбрать именно его магнитный момент M_k , а не фиктивный магнитный заряд m , который носит лишь вспомогательный характер. Однако, если остаться только в рамках магнетизма постоянных магнитов без гипотезы Ампера, нельзя раскрыть физическую сущность понятия

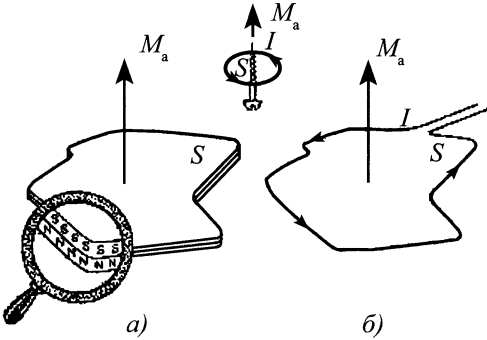


Рис. 1.12. Правило буравчика для определения направления магнитного момента M_a замкнутого контура с током I : а – магнитный лист (двойной магнитный слой) площадью S ; б – плоский контур тока I , эквивалентный магнитному листу

магнитного момента, и придется пользоваться лишь приведенной выше электростатической аналогией.

Из анализа картины расположения частиц магнитного порошка вокруг замкнутого контура с электрическим током (см. рис. 1.7, б) легко предположить, каким аналогом будет плоский магнитный лист (точнее, двойной магнитный слой очень малой толщины, вписанный в круговой ток), или произвольный замкнутый контур тока.

Магнитный момент кругового тока по правилу буравчика будет направлен вдоль оси магнита (рис. 1.12) или перпендикулярен к плоскости произвольного контура.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Магнитное поле – силовое поле движущихся электрических зарядов, пропорциональное значению этих зарядов и направленное нормально к направлению их движения.

Силовые линии магнитного поля – линии, вдоль которых устанавливается магнитная стрелка в данной точке. Направление принимается от южного полюса к северному магнитной стрелки. Линии магнитного поля всегда замкнуты.

Напряженность магнитного поля \mathbf{H} – векторная величина, характеризующая магнитное поле, циркуляция которого по замкнутому контуру всегда равна алгебраической сумме сил токов, протекающих через поверхность, ограниченную этим контуром (закон полного тока):

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum \mathbf{I},$$

где $d\mathbf{l}$ – элемент контура; $\sum \mathbf{I}$ – сумма токов через поверхность, ограниченную контуром.

Единица напряженности магнитного поля – ампер на метр (А/м).

Магнитная индукция \mathbf{B} – векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу (силу Лоренца в магнитном поле):

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}_L}{q\mathbf{v}},$$

где \mathbf{F}_L – сила Лоренца; q , \mathbf{v} – заряд и скорость частицы.

Единица магнитной индукции – тесла (Тл). Магнитное поле имеет индукцию, равную 1 Тл, если на заряд в 1 кулон (Кл), движущийся перпендикулярно к направлению линии поля со скоростью 1 м/с, действует сила в 1 ньютон (Н):

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ м}}.$$

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением линий поля (линии поля называют также линиями индукции).

Поведение кругового тока во внешнем магнитном поле напряженностью $H_{\text{внеш}}$ будет идентично поведению электрического диполя в электрическом поле напряженностью $E_{\text{внеш}}$, если вместо электрического момента P диполя подставить его магнитный момент M_a , уже выраженный не через фиктивные магнитные заря-

ды, а связанный с током I , протекающим по контуру, и с площадью S контура, охватываемого проводом с током I .

Магнитный поток Φ – поток вектора магнитной индукции сквозь некоторую поверхность площадью S :

$$\Phi = \mathbf{BS} = BS \cos \alpha,$$

где α – угол между векторами индукции \mathbf{B} и поверхности S .

Единица потока индукции – вебер (Вб). Один вебер – это поток, проникающий через поверхность площадью 1 м^2 , перпендикулярную к линии однородного магнитного поля с индукцией в 1 Тл :

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Поток достигает наибольшего значения, если вектор \mathbf{S} параллелен вектору \mathbf{B} , т.е. поверхность расположена перпендикулярно к линии индукции.

Магнитная постоянная μ_0 – коэффициент пропорциональности между величинами B и H в вакууме (ее называют также проницаемостью вакуума); выражается в генри на метр:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Магнитный диполь – любой элементарный объект, создающий на больших по сравнению с его размерами расстояниях магнитное поле, идентичное магнитному полю элементарного контура с током.

Магнитный момент \mathbf{P}_m магнитного диполя – векторная величина, идентичная магнитному моменту контура с током:

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{IS},$$

где \mathbf{I} – элементарный электрический ток; \mathbf{S} – контур, по которому он протекает.

Магнитный момент \mathbf{P}'_m фиктивного магнитного диполя – векторная величина:

$$\mathbf{P}'_m = \mathbf{m} l,$$

где \mathbf{m} – величина одного из двух фиктивных разноименных магнитных зарядов; l – расстояние между ними. Введение фиктивных (не существующих в природе) зарядов помогает решить некоторые практические задачи.

Намагниченность \mathbf{M} – векторная величина, характеризующая магнитное состояние вещества, определяемая суммой магнитных моментов элемента объема V , когда он стремится к нулю:

$$\mathbf{M} = \lim_{V \rightarrow 0} (\mathbf{P}_m/V);$$

является мерой магнитной поляризации вещества.

Единица намагниченности – А/м.

Магнитная восприимчивость χ – величина, характеризующая свойство вещества намагничиваться в магнитном поле:

$$\chi = M/H;$$

для изотропного вещества является величиной безразмерной и скалярной, для анизотропного – величиной тензорной.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a – величина, характеризующая магнитные свойства вещества и определяющая магнитное состояние вещества в магнитном поле:

$$\mu_a = B/H;$$

для изотропного вещества μ_a – величина безразмерная и скалярная, для анизотропного – тензорная.

Дифференциальная магнитная проницаемость μ_d – величина, характеризующая приращение индукции ΔB при изменении поля на ΔH , когда последнее стремится к нулю:

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

Относительная магнитная проницаемость μ – отношение абсолютной магнитной проницаемости к магнитной постоянной (проницаемости вакуума).

Магнитное сопротивление R_m – скалярная величина, равная отношению разности магнитных потенциалов на рассматриваемом участке магнитной цепи к магнитному потоку в этом участке.

Магнитная проводимость Λ – скалярная величина, равная отношению магнитного потока в рассматриваемом участке магнитной цепи к разности магнитных потенциалов на этом участке.

Удельная энергия (плотность) магнитного поля W – величина, равная половине скалярного произведения вектора магнитной индукции на вектор напряженности

магнитного поля в какой-либо точке поля.

Основные магнитные величины и соотношения между ними приведены в табл. 1.1.

1.1. Основные магнитные величины и уравнения магнетизма

Величина	Обозначение	Основные уравнения	Наименование и обозначение единицы	Соотношение единиц
Магнитное потокосцепление	Ψ	$\Psi = w \Phi$	Вебер, Вб	$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$
Магнитный поток	Φ	$\Phi = BS$		
		магнита	$\Phi = IL$	
	соленоида			
Магнитодвижущая сила	F	$F = Iw$	Ампер, А	–
Напряженность магнитного поля	H	$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$	Ампер на метр, А/м	–
Намагниченность	магнита	$M = P_m/V_m$	Ампер на метр, А/м	–
	вещества	$M = \chi H$		
Магнитный момент	магнита	$P = MV$	Ампер-квадратный метр, $\text{А} \cdot \text{м}^2$	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/Тл}$
	соленоида	$P = Iw S = MV$		
	диполя	$P = ql$		
Магнитный заряд диполя	q	$q = P/l$	Ампер-метр, $\text{А} \cdot \text{м}$	–
Магнитная индукция	B	$B = \mu_0(H + M)$	Тесла, Тл	$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2 = 1 \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А/м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с/м}^2$
Внутренняя индукция	B_i	$B_i = \mu_0 M$	Тесла, Тл	$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{Кл/А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А} = 1 \text{ Вб/А}$
Индуктивность	L	$L = \Phi/I$	Генри, Гн	
Магнитная проводимость	Λ	$\Lambda = \mu_a S/l$		
Магнитная проницаемость (абсолютная)	μ_a	$\mu_a = B/H = \mu_0 \mu_r$	Генри на метр, Гн/м	$1 \text{ Гн/м} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м/А}$
Магнитная постоянная	μ_0	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$		
Магнитная восприимчивость	χ	$\chi = M/H = \mu_r - 1$	–	–
Удельная магнитная энергия	W	$W = BH/2$	Джоуль на кубический метр, Дж/м^3	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} = 1 \text{ А} \cdot \text{Вб}$

1.3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Магнитные свойства вещества в общем случае определяются совокупностью ряда физических явлений:

- движением электронов по орбитам вокруг ядра (при этом создается орбитальный магнитный момент);
- свойствами электронов, которые связаны с созданием спинового магнитного момента;
- строением электронных оболочек атома;
- электростатическим взаимодействием между электронными оболочками соседних атомов с некомпенсированными спинами (обменное взаимодействие);
- энергетическими соотношениями в веществе, что связано с созданием замкнутых макроскопических областей, называемых доменами.

Типы магнетиков различают по их магнитной восприимчивости, которая зависит от указанных выше факторов, а также температуры, давления и др. При нормальных условиях по значению, знаку

и зависимости $\chi(H)$ различают несколько типов магнетиков: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики и т.д. В табл. 1.2 приведены три основных типа магнетиков и некоторые из веществ, относящихся к определенному типу.

Диамагнетизм проявляется во всех веществах независимо от их агрегатного состояния, но чаще всего диамагнитные явления перекрываются более сильными (пара- и ферромагнетизмом).

Диамагнетик во внешнем магнитном поле намагничивается противоположно полю. Данное явление связано с прецессией орбит электронов (прецессия Лармора) вокруг направления внешнего поля. В однородном магнитном поле диамагнетик стремится занять положение, перпендикулярное к направлению магнитного поля, а в неоднородном поле выталкивается из него. Это явление используется, например, при создании магнитных опор без трения, где в качестве элементов осей, помещенных в неоднородное магнитное поле, применяется поликристаллический или пиролюзитический углерод ($\chi \approx -6 \cdot 10^{-4}$). Диамагнетизмом обладают сверхпроводники.

1.2. Свойства различных магнетиков

Магнетик	Значение магнитной восприимчивости χ	Примеры веществ	Взаимодействие с полем
Диамагнетик	-10^{-5}	Водород, азот, инертные газы, золото, ртуть, кремний, фосфор, дерево, мрамор, вода	Слабое
Парамагнетик	$+(10^{-5} \dots 10^{-2})$	Кислород, литий, алюминий, натрий, платина, калий, молибден, цезий, рубидий, осмий, вольфрам, цирконий	
Ферромагнетик	$+(10 \dots 10^5)$	Железо, никель, кобальт, редкоземельные металлы, тербий, гадолиний, тулий, диспрозий, эрбий и их сплавы и соединения	Сильное

Парамагнетизм присущ всем веществам в газообразном, жидком и твердом состояниях, имеющим нескомпенсированный магнитный момент атомов. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты хаотически разориентированы ($M = 0$), при наложении поля они ориентируются по его направлению, и парамагнетик приобретает намагниченность. При комнатной температуре парамагнитные вещества невозможно довести до состояния магнитного насыщения, поскольку тепловое движение атомов разориентирует ориентацию магнитных моментов на направление поля.

1.4. ФЕРРОМАГНЕТИКИ. ПРИРОДА ФЕРРОМАГНЕТИЗМА

В ферромагнетике под действием магнитного поля H создается такая намагниченность M , которая в десятки и сотни раз превышает первопричину, т.е. намагничивающее поле H . Эта способность сохраняется у ферромагнетиков до определенной температуры, называемой температурой Кюри (θ). У разных ферромагнетиков значения θ различны: например, для кобальта $\theta = 1120$ °С, железа – 768, никеля – 358, гадолиния – 17 °С.

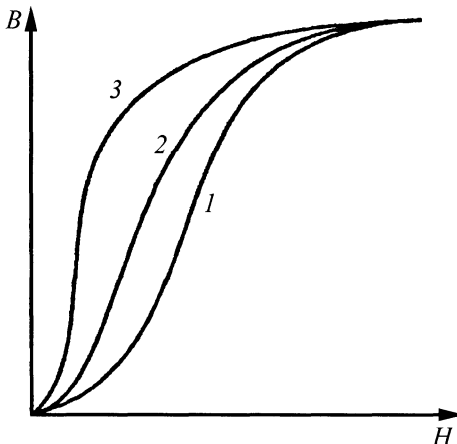


Рис. 1.13. Начальная (1), основная (2) и идеальная (3) кривые намагничивания

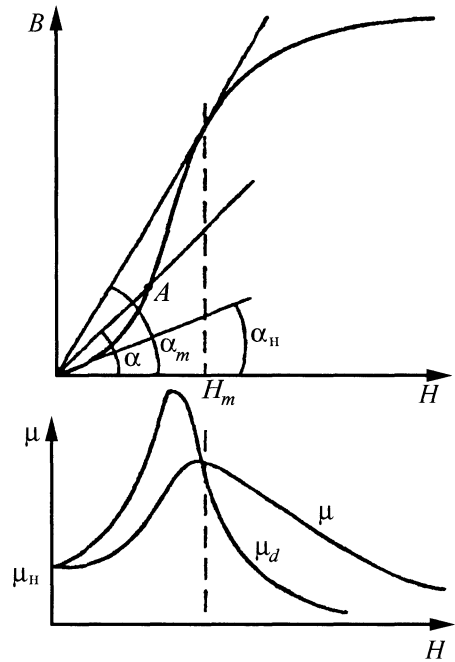


Рис. 1.14. Зависимости B , μ и μ_d от H

С увеличением намагничивающего поля намагниченность возрастает все медленнее. Если в малых полях $M \gg H$, то в больших величина H становится сравнима с M ; во всяком случае, при исследовании процессов в ферромагнетике значением H нельзя пренебрегать, поэтому в рассмотрение вводят сумму $(H + M)$:

$$B = \mu_0(H + M).$$

Намагниченность M , а следовательно, и индукция B , зависят от H нелинейным образом. Кривые типа $M = f(H)$ и $B = f(H)$ называют кривыми намагничивания. Их вид может быть различен в зависимости от способа получения (измерения) и исходного состояния ферромагнетика. В качестве исходного состояния ферромагнетика следует принять размагниченное.

Некоторые виды кривых намагничивания представлены на рис. 1.13.

Начальную кривую 1 получают измерением B при постепенном увеличении H из состояния $B = 0$, $H = 0$. Эта кривая часто невоспроизводима, так как зависит от

многих случайных причин (сотрясений, температуры и др.). Основную (коммутационную) кривую 2 получают таким образом: перед измерением каждой точки поле переключают несколько раз с положительного на отрицательное (циклическое перемагничивание). Идеальную безгистерезисную кривую 3 получают так же, но перед измерением каждой точки на образец воздействуют переменным полем с убывающей до нуля амплитудой (возможны и другие воздействия, облегчающие процесс намагничивания, например, механические).

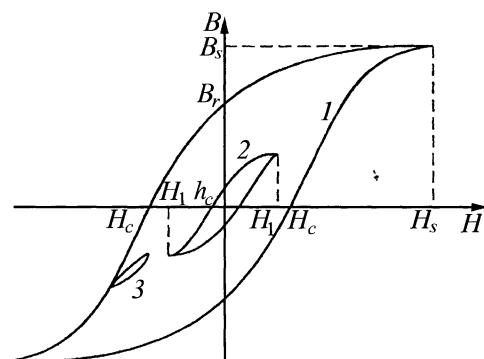


Рис. 1.15. Петли гистерезиса

Магнитная проницаемость μ ферромагнетика нелинейным образом зависит от H . Проницаемость μ определяется углом α (из соотношения $\mu_0\mu = B/H = \operatorname{tg}\alpha$), причем есть характерные точки (рис. 1.14): начальный угол α_n , максимальный угол α_m , которые соответствуют полям $H \rightarrow 0$ (в этом случае проницаемость называют начальной μ_n) и H_m (проницаемость называют максимальной и обозначают μ_{\max} ; поле H_m называют полем максимальной магнитной проницаемости. На рис. 1.14 показана зависимость от H проницаемости μ , а также дифференциальной проницаемости μ_d . При $H = 0$ $\mu = \mu_d > 1$, далее обе проходят через максимум, совпадают при $H = H_m$; в больших полях $\mu_d \rightarrow 1$, а $\mu \rightarrow 1$ только при $H \rightarrow \infty$.

Магнитный гистерезис. Характерной особенностью ферромагнетиков является то, что при уменьшении поля после намагничивания до некоторого значения B функция $B(H)$ будет иметь иной вид, чем при увеличении, и при $H = 0$ окажется, что $B \neq 0$. Если построить график $B = f(H)$, уменьшая поле от некоторого значения $+H_1$ до $-H_1$, а затем увеличивая от $-H_1$ до $+H_1$, то получится кривая, напоминающая петлю, которая называется петлей магнитного гистерезиса (рис. 1.15). Начиная измерения с различных значений H , можно получить семейство петель гистерезиса, при этом их вершины лежат на основной кривой намагничивания. Однако существует поле H_s , при котором измерения с

$H \geq H_s$ уже не дают новых петель, совпадая между собой. Петля гистерезиса, построенная при циклическом перемагничивании от $+H_s$ до $-H_s$, называется предельной. Она является важнейшей характеристикой данного ферромагнетика.

Индукцией насыщения B_s (см. рис. 1.15) называют индукцию, соответствующую намагниченности насыщения M_s , когда с увеличением H намагниченность не возрастает, а увеличение B осуществляется только за счет H .

Остаточная индукция B_r (см. рис. 1.15) – индукция, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения ферромагнетике после снятия намагничивающего поля H .

Коэрцитивной силой H_c (см. рис. 1.15) называют напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено, чтобы установить значение $B = 0$.

Можно говорить о B_r и H_c для любых петель гистерезиса, однако обычно под остаточной индукцией и коэрцитивной силой понимают (если это не оговаривается особо) их значения по предельной петле.

Что касается H_c , то различают коэрцитивную силу по индукции ${}_B H_c$ и коэрцитивную силу по намагниченности ${}_M H_c$. Их различие показано на рис. 1.16: величина B больше $\mu_0 M$ на величину $\mu_0 H$, поэтому B_r и M_r совпадают (так как $H = 0$), а ${}_B H_c$ и ${}_M H_c$ различаются.

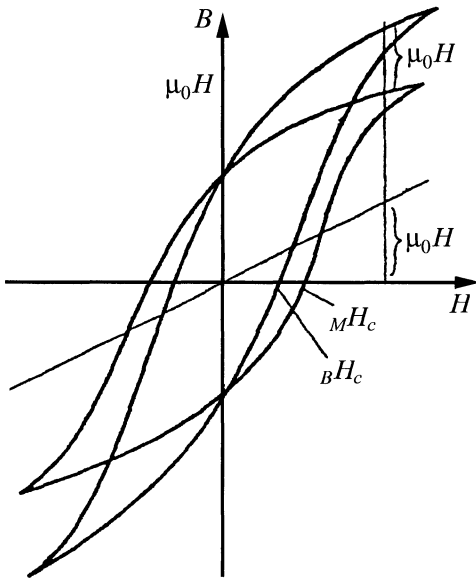


Рис. 1.16. Отличие H_c по намагниченности от H_c по индукции

Для обычных материалов это различие несущественно, оно имеет значение только для магнито жестких (высококоэрцитивных) материалов.

Площадь петли гистерезиса равна работе P , затраченной на перемагничивание единицы объема ферромагнетика, Дж/м³:

$$P = \oint H dB.$$

Часто используется понятие удельных потерь – затрат энергии на перемагничивание единицы массы ферромагнетика в единицу времени:

$$p_r = sf / \gamma,$$

где s – площадь петли гистерезиса, измеренная в квазистатическом режиме, Тл · А/м; f – частота перемагничивания, Гц; γ – плотность материала, кг/м³.

Обменная энергия. Одно из основных свойств ферромагнетиков – приобретать большую намагниченность уже в малых намагничивающих полях – можно объяснить следующим образом (гипотеза Вейсса). Представим, что в ферромагнетике

существуют области, которые сами по себе намагничены, т.е. имеют определенный магнитный момент. Эти области ориентированы произвольным образом, при этом суммарный магнитный момент в отсутствие внешнего поля H_e равен нулю. Однако достаточно приложить небольшое поле H_e , и они ориентируются вдоль него, ферромагнетик при этом приобретает значительную намагниченность. Такие области с самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью называются доменами.

Наличие определенного момента в домене означает, что элементарные магнитные моменты атомов ориентированы параллельно. Это положение должно быть устойчиво, т.е. энергетически выгодно, система имеет минимум энергии. И такой минимум для некоторых веществ действительно имеет место, однако энергия, о которой идет речь, может быть понята только с позиций квантовой механики.

Качественное представление об этой энергии можно составить из следующих рассуждений. Пусть имеется система из двух атомов. Когда они расположены далеко друг от друга, энергия этой системы равна сумме энергий каждого из атомов:

$$E = 2E_0.$$

При сближении атомов появляется добавочная энергия E_b , связанная с их взаимодействием:

$$E = 2E_0 \pm E_b,$$

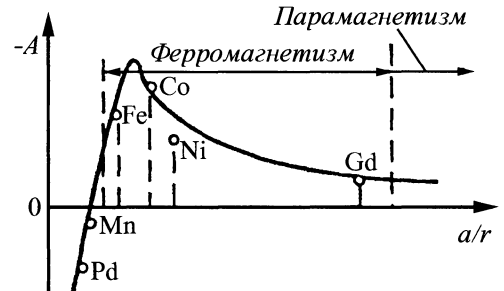


Рис. 1.17. Зависимость обменной энергии A от отношения a/r

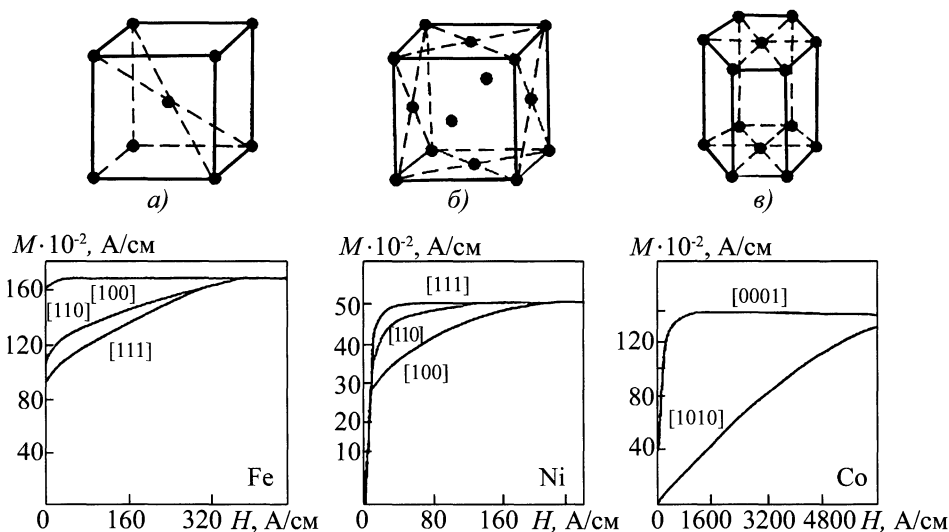


Рис. 1.18. Элементарные ячейки Fe (а), Ni (б), Co (в) и кривые намагничивания вдоль кристаллографических осей

которая состоит из двух частей:

$$E_b = C \pm A,$$

где C – энергия кулоновского взаимодействия атомов; A – обменная энергия, не имеющая аналогов в классической физике.

В квантовой механике предполагается, что электрон одного атома может оказаться вблизи ядра другого атома и, наоборот, – электрон соседнего атома может оказаться вблизи первого. Происходит как бы обмен электронами между атомами, что и приводит к появлению "добавки" A . Еще раз оговоримся, что это рассуждение качественное, здесь нет наглядной модели. Но из этих рассуждений можно предположить, что на величину A существенное влияние должно оказывать расстояние между атомами. Действительно, как показали расчеты Френкеля и Гайзенберга, при малых расстояниях между атомами ферромагнетизм невозможен, а при очень больших обменное взаимодействие уменьшается. Существует некоторая область расстояний между атомами, определяемых в основном кристаллической решеткой (на

рис. 1.17 это расстояние отнесено к радиусу оболочки атома* r), когда обменная энергия (или обменный интеграл) играет существенную роль, а ее минимум соответствует параллельному положению элементарных магнитных моментов. На рис. 1.17 видно, что ферромагнетизмом обладают железо, кобальт, никель, гадолиний.

Некоторые вещества, в чистом виде не обладающие ферромагнетизмом, в сплаве с другими элементами могут стать ферромагнитными. Например, Mn в сплаве с Cu и Al становится ферромагнетиком вследствие увеличения a .

Обменная энергия стимулирует параллельную ориентацию элементарных магнитных моментов в домене. То, что в ферромагнетике оказывается много доменов (бывают и однодоменные кристаллы), обусловлено другими видами энергии, которые рассмотрим ниже.

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии. В ферромагнитных

* К радиусу незаполненной оболочки. Для уточнения этого понятия необходимо обратиться к специальной литературе.

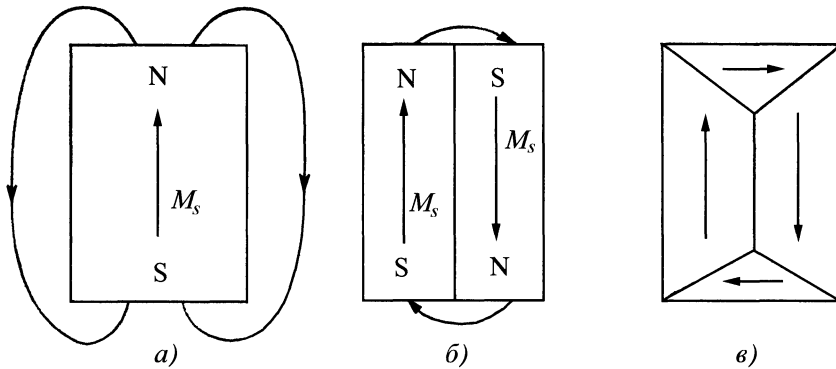


Рис. 1.19. Уменьшение магнитостатической энергии вследствие разбиения ферромагнитного тела на домены

кристаллах существуют оси легкого и трудного намагничивания. На рис. 1.18 показаны кривые намагничивания для разных кристаллографических осей Fe (объемно-центрированная решетка), Ni (гранецентрированная) и Co (гексагональная). Спонтанная (самопроизвольная) намагниченность в каждом домене ориентируется вдоль оси легкого намагничивания. Чтобы намагнитить ферромагнетик в более трудном направлении, необходимо затратить определенную энергию, равную площади между этими кривыми и являющуюся мерой энергии естественной кристаллографической магнитной анизотропии. В некоторых случаях анизотропия может отсутствовать, например, для сплава Fe–Ni с 70 % Ni.

Можно считать, что существует некоторое поле анизотропии H_a , которое препятствует отклонению магнитных моментов ферромагнетиков от направления легкого намагничивания:

$$H_a = K_1/M_s,$$

где K_1 – константа анизотропии.

Магнитоупругая энергия. При намагничивании ферромагнетиков наблюдается изменение их объемных или линейных размеров. Это явление получило название соответственно объемной или линейной магнитоупругости. Относительное удлине-

ние $\Delta l/l$ может составлять $10^{-5} \dots 10^{-3}$. Магнитоупругая энергия возникает под воздействием напряжений и пропорциональна их значению и магнитоупругости.

Магнитостатическая энергия. Ферромагнетик, помещенный в однородное магнитное поле, обладает энергией

$$E_m = -\mu_0 M H \cos \alpha.$$

В состоянии остаточной намагниченности M_r разомкнутый ферромагнетик имеет полюсы, которые создают размагничивающее поле H_p , поэтому он будет обладать магнитостатической энергией, являющейся основной причиной разбиения его на домены.

Магнитные домены. На рис. 1.19, а показан ферромагнетик в однодоменном состоянии, обладающий значительной магнитостатической энергией (полюсы N и S). Она уменьшается при разбиении ферромагнетика на два домена (рис. 1.19, б) и может исчезнуть совсем при образовании замыкающих 90-градусных доменов (рис. 19, в). Таким образом, возникновение доменной структуры – это эффект саморазмагничивания ферромагнитного кристалла. Расчеты показывают, что при образовании доменной структуры выигрыш энергии достигает нескольких порядков. Однако две антипараллельные области спонтанного намагничивания (см. рис.

1.19, б) не могут непосредственно примыкать друг к другу, так как в этом случае будет велико значение обменной энергии на их границе, поэтому 180-градусная граница между доменами имеет определенную толщину (рис. 1.20), зависящую от обменной энергии и от энергии кристаллографической анизотропии (поворот векторов для этой энергии невыгоден). Толщина доменной границы

$$\delta = a\sqrt{A/K},$$

где a – некоторый коэффициент.

Экспериментально существование доменов впервые было подтверждено Баркгаузенем, который зарегистрировал элементарные акты намагничивания ферромагнетика, названные скачками Баркгаузена (подробнее см. гл. 17). Позднее Акулов и Биттер с помощью очень мелких ферромагнитных порошков наблюдали доменную структуру (порошок оседал на границах доменов).

Кривая намагничивания. По характеру процессов намагничивания кривую намагничивания условно можно разбить на пять участков (рис. 1.21).

Участок *I* характеризуется *постоянной восприимчивостью* (проницаемостью), т.е. $\chi_n = M/H = \text{const}$, $\mu_n = B/(\mu_0 H) = \text{const}$. Намагничивание ферромагнетика на этом участке кривой намагничивания осуществляется за счет обратимого (упругого) смещения доменных границ.

Участок *II* носит название *области Релея*. Намагничивание на этом участке осуществляется в основном за счет смещения доменных границ. Для этой области кривой намагничивания справедлив закон Релея, который выполняется практически для всех ферромагнетиков, за исключением тех, у которых эта область может отсутствовать. Намагниченность в области Релея определяется как

$$M = \chi_n H + bH^2,$$

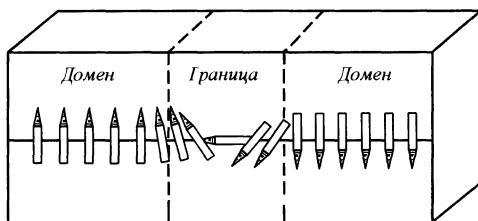


Рис. 1.20. Схема изменения ориентации атомных моментов внутри 180-градусной доменной границы

где b – коэффициент Релея; второе слагаемое в этом уравнении учитывает необратимые процессы при намагничивании.

Участок *III* характеризуется *высоким значением магнитной восприимчивости* (проницаемости). В этой области намагниченность изменяется большими скачками Баркгаузена, вызванными необратимым смещением доменных границ. Для многоосных магнито жестких материалов кроме процессов смещения в этом диапазоне полей характерны процессы скачкообразного вращения векторов намагниченности.

На участке *IV* восприимчивость постепенно уменьшается. Процесс намагничивания осуществляется в основном за счет вращения векторов спонтанной намагниченности на направление внешнего магнитного поля. Работа по повороту векторов спонтанной намагниченности на направление действующего поля затрачивается на преодоление кристаллографичес-

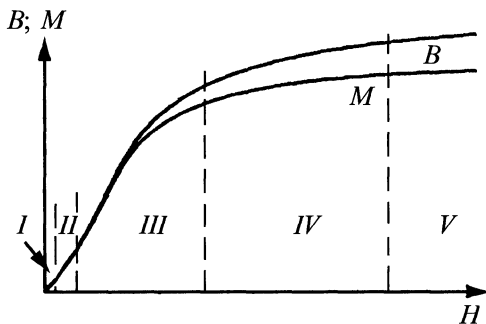


Рис. 1.21. Основные участки кривой намагничивания

ской анизотропии, которая стремится удержать векторы спонтанной намагниченности в направлении легкого намагничивания. Процессы вращения происходят преимущественно обратимо. Для этого участка справедлив закон приближения к насыщению

$$M = M_s \left(1 - \frac{A}{H} - \frac{B}{H^2} - \frac{C}{H^3} - \dots \right) + \chi_p H,$$

где M_s – намагниченность насыщения; A , B , C – постоянные коэффициенты, которые определяют вклад различных структурных факторов, влияющих на процесс намагничивания; χ_p – восприимчивость парапроцесса. Выражение справедливо для полей, при которых ферромагнетик намагничен до технического насыщения.

Участок V соответствует парапроцессу. Процессы смещения и вращения закончены. На этом участке в сильных магнитных полях незначительное увеличение намагниченности связано с дополнительной ориентацией спиновых магнитных моментов в направлении приложенного поля.

1.5. НАМАГНИЧИВАНИЕ ТЕЛ

Коэффициент размагничивания. Все изложенное в п. 1.4 относится к бесконечному веществу или, во всяком случае, к веществу без границ. На границе магнетика изменяется намагниченность, например, на границе с воздухом – от M (в ферромагнетике) до 0 (в воздухе). Если граница параллельна M , то это изменение вполне понятно: магнитный поток Φ ($\Phi = BS$) сосредоточен внутри магнетика. Если эта граница перпендикулярна к направлению M , то считают, что здесь создаются полюсы величиной MS (S – площадь границы), являющийся источником поля в воздухе. Но если есть полюс, то поле от него направлено во все стороны, в том числе и внутрь магнетика, так что внутри магнетика

$$H_i = H_e - H_p,$$

где H_i – поле внутри магнетика; H_e – внешнее поле (поле источника, например соленоида, охватывающего магнетик); H_p – поле, обусловленное границей (размагничивающее поле).

Очевидно,

$$H_p = NM,$$

где N – коэффициент размагничивания, зависящий в основном от формы границы (формы изделия).

В большинстве случаев тело намагничивается неоднородно, M и N в разных точках различны, поэтому пользуются некоторыми усредненными значениями N . Однородно намагничиваются только эллипсоиды, и для них значения N определены. Для проволоки диаметром d и длиной l , намагничиваемой в направлении l , значения N приведены ниже:

l/d	1	2	5	10
N	0,27	0,14	0,04	0,017
l/d	20	50	500	
N	0,006	0,0013	$13 \cdot 10^{-6}$	

Коэффициенты размагничивания эллипсоидов. Детальные расчеты коэффициентов размагничивания однородных тел, ограниченных поверхностями второго порядка, т.е. эллипсоидов, выполнил Осборн. Формулы для N_a , N_b , N_c эллипсоида с осями a , b , c имеют достаточно сложный характер, но для некоторых простых случаев они могут быть упрощены. При этом

$$N_a + N_b + N_c = 1,$$

так что для шара (наиболее простой случай) $N = 1/3$.

Предположим, что $a \geq b \geq c \geq 0$. Пусть $b = c$ и, кроме того, $m = a/c \gg 1$, т.е. очень тонкий вытянутый сфероид (почти проволока), тогда

$$N_a \cong \frac{1}{m^2} [\ln(2m) - 1];$$

$$N_b = N_c \cong \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ln(2m) - 1}{m^2} \right) \approx \frac{1}{2}.$$

Значения N_a и приведенные для проволоки выше совпадают, начиная примерно с $l/d = 20$ (по условию $a/c \gg 1$). Для эллиптического цилиндра при $a = \infty$, $b \gg c$

$$N_b = c/(b+c); \quad N_c = b/(b+c).$$

Для этого случая также при $b = c$ $N = 1/2$ (очень длинная проволока, намагничиваемая поперек).

Коэффициент размагничивания пластины. Пусть пластина намагничивается полем H_c перпендикулярно к наибольшему размеру полосы (рис. 1.22). Если величина заряда на единицу длины грани, перпендикулярной к направлению H_e , есть q , то напряженность поля, создаваемого одной гранью на расстоянии r ($r \gg t$, где t – толщина полосы),

$$H_p = \frac{q}{2\pi\mu_0 r}.$$

Поскольку плотность поверхностных зарядов $\sigma = \mu_0 M_n$, то $q = \sigma t = \mu_0 M_n t$. Для центрального сечения полосы шириной, равной расстоянию от края, $r = b/2$, а полное поле создается двумя гранями:

$$H_p = -2 \frac{\mu_0 M_n t}{2\pi\mu_0 (b/2)} = \frac{2t}{\pi b} M_n.$$

Так как $H_p = -NM_n$, $N = 2t/(\pi b)$.

Магнитная проницаемость тела.

Выражение $B = \mu_0 \mu H$ справедливо для вещества; здесь μ – проницаемость вещества, H – поле внутри вещества. Аналогично этому можно записать

$$B = \mu_0 \mu_\tau H_e,$$

где H_e – внешнее намагничивающее поле.

Из этих формул с учетом $H_i = H_e - NM$ и $M = (\mu - 1)H$ получаем выражение для магнитной проницаемости тела

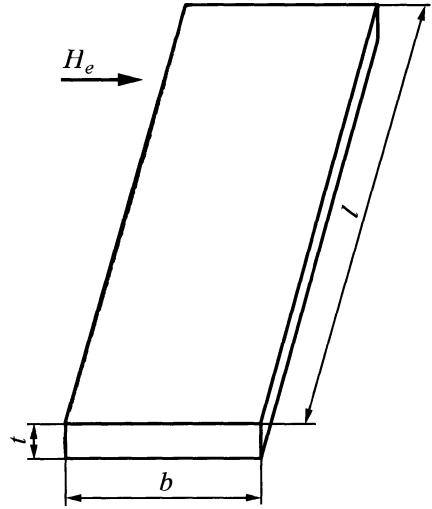


Рис. 1.22. Пластина в поперечном магнитном поле

$$\mu_\tau = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}.$$

При $\mu \gg 1$

$$\mu_\tau = \frac{1}{N} = \mu_\phi,$$

где μ_ϕ – проницаемость формы, зависящая только от геометрических параметров тела.

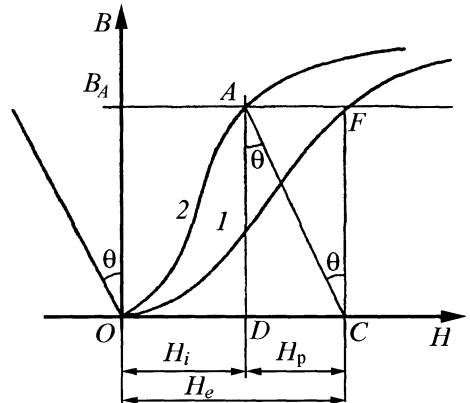


Рис. 1.23. Построение кривой намагничивания тела (1) по кривой намагничивания материала (2)

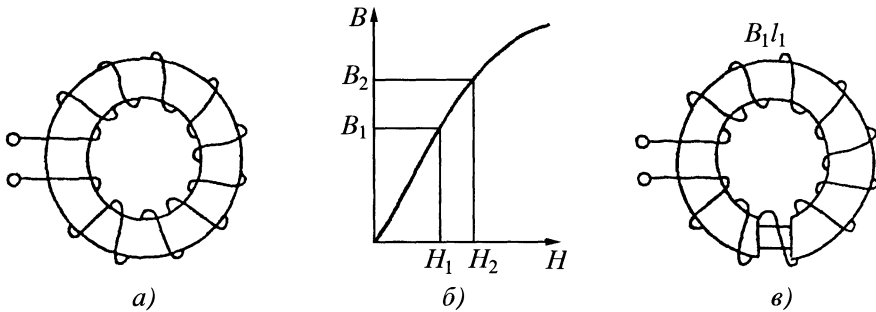


Рис. 1.24. Схемы и график к расчету магнитной цепи с тороидом

Кривая намагничивания тела. Перестроим кривую намагничивания для вещества в кривую намагничивания для тела (рис. 1.23).

На рис. 1.23 такое перестраивание проведено для точки A , соответствующей полю $H_i = OD$. Проведем AC так, чтобы $\operatorname{tg} \theta = N$. Тогда $OC = OD + DC = H_i + B_A N = H_i + H_p = H_e$ (здесь для поля в веществе введено специальное обозначение H_i).

На кривой намагничивания тела индукции B_A соответствует точка F . Кривая намагничивания тела (кривая I) станет пологой, особенно для больших значений N .

Такое же перестраивание можно выполнить для петли гистерезиса, при этом легко убедиться, что значение H_c остается неизменным для вещества и тела (B_r для тела меньше, чем для вещества).

Магнитные цепи. Совокупность магнетиков, по которым проходит поток магнитной индукции, называют магнитной цепью. В магнитной дефектоскопии магнитной цепью может быть собственно изделие (например, коленчатый вал, намагничиваемый соленоидом) либо изделие совместно с приставным электромагнитом.

Для расчета магнитных цепей используют закон полного тока

$$\sum Hl = nI,$$

а также законы, аналогичные законам Ома и Кирхгофа для электрической цепи:

для участка цепи

$$\Phi = U_m / R_m;$$

для узла цепи

$$\sum \Phi = 0; \quad \sum F = \sum \Phi R_m.$$

Здесь l – длина участка магнитной цепи; n – число витков намагничивающей катушки; I – сила намагничивающего тока; F – намагничивающая сила; U_m – разность магнитных потенциалов между концами участка цепи; R_m – магнитное сопротивление. При этом

$$F = HI; \quad \Phi = BS; \quad R_m = l / (\mu_0 \mu S),$$

где S – площадь сечения магнитопровода.

Пример 1. Имеется цепь, содержащая ферромагнитный сердечник постоянного сечения. Необходимо в сердечнике получить заданную индукцию B_1 . По закону полного тока $HI = nI$.

Здесь $l = 2\pi r$ (рис. 1.24, а), а H определяется по кривой $B = f(H)$ (рис. 1.24, б). Пусть $B_1 = 1,5$ Тл, $r = 0,01$ м. Находим $H_1 = 2000$ А/м. Тогда $nl = 126$ А.

Пример 2. Цепь содержит ферромагнитный сердечник переменного сечения (рис. 1.24, в). Пренебрежем потоками рас-

сеяния, т.е. $\Phi = \text{const}$, следовательно, $B_1 S_1 = B_2 S_2$. Закон полного тока

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = nI.$$

Пусть необходимо получить $B_2 = 1,5$ Тл, $l_2 = 0,005$ м, а $S = 0,5 S_1$. Тогда $B_1 = 0,5$, $B_2 = 0,75$ Тл. По рис. 1.24, б находим $H_1 = 1200$ А/м. Итак, $nI = 2\,000 \cdot 0,005 +$

$+ 1200 \cdot 0,0578 = 79,4$ А, что существенно меньше, чем в предыдущем случае.

Пример 3. Рассмотрим тороид с разрезом. Пусть на длине l_2 ферромагнетик отсутствует. Индукция в этом зазоре должна остаться такой же, тогда $H_2 = B_2 / \mu_0 \cong 1 \cdot 10^6$ А/м; $nI = 10^6 \cdot 0,005 + 2000 \cdot 0,0578 = 5126$ А.

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ДЕФЕКТОВ

При намагничивании короткой детали изделия на ее торцах создаются магнитные полюсы. По аналогии с электростатикой им приписывают определенный магнитный заряд (фиктивный), поверхностная плотность которого численно равна изменению намагниченности. Если в сечении детали имеется нарушение сплошности или другая неоднородность, приводящая к изменению намагниченности, то в этом месте также образуются полюсы, поле которых образует магнитное поле рассеяния дефекта (в зарубежной литературе магнитный метод часто называют методом потоков рассеяния).

Магнитное поле рассеяния дефекта H_d тем больше, чем больше дефект и чем ближе он к поверхности, над которой проводится измерение.

В некоторых материалах (например, легированных и высокоуглеродистых сталях) H_d принимает большие значения при остаточной намагниченности. По значению и топографии (пространственному распределению) H_d , в принципе, можно судить о размерах и расположении дефек-

та. Установить точную связь H_d с геометрическими параметрами дефектов и магнитными характеристиками изделий в аналитическом виде не представляется возможным. Для оценки этой связи пользуются различными моделями и приближениями, наиболее распространенные из которых представлены в табл. 2.1.

Формулы 6 в табл. 2.1 – точные, получены решением уравнения Лапласа для безграничной среды, описываемой уравнением

$$V = \mu_0 \mu H.$$

Те же формулы пригодны и в случае сред, для которых

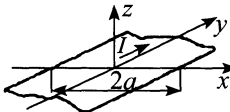
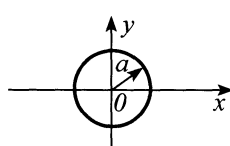
$$V = \mu_0 (\mu H + M),$$

где $\mu = \text{const}$ (так называемое приближение технического насыщения).

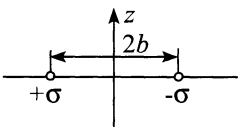
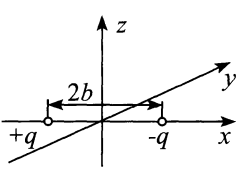
Если в формулах 6 заменить H_0 на H'_0 , то

$$H'_0 = H_0 + \mu / (\mu - 1).$$

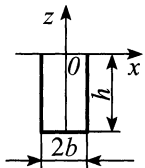
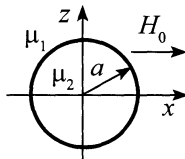
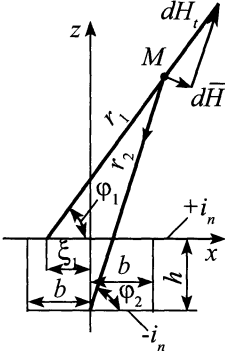
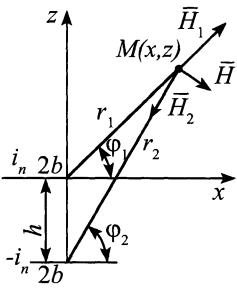
2.1. Напряженность магнитных полей некоторых объектов

№ п/п	Объект	Формулы для расчета
1	 <p>Тонкая пластина с током</p>	$H_x = \frac{1}{4\pi\mu_0 a} \left[\arctg \frac{x+a}{z} + \arctg \frac{a-x}{z} \right];$ $H_y = \frac{1}{4\pi\mu_0 a} \ln \frac{(x-a)^2 + z^2}{(x+a)^2 + z^2}$
2	 <p>Однородно-заряженный цилиндр или нить с линейной плотностью</p>	$\left. \begin{aligned} H_x &= \frac{\sigma_x}{2\pi\mu_0 (x^2 + z^2)} \\ H_y &= \frac{\sigma_y}{\pi\mu_0 (x^2 + z^2)} \end{aligned} \right\} r > a$

Продолжение табл. 2.1

№ п/п	Объект	Формулы для расчета
3	 <p>Две равномерно заряженные нити</p> <p>Дипольная нить: $b \rightarrow 0, \sigma \rightarrow \infty,$ $\lim b\sigma = D$</p>	$H_x = \frac{\sigma}{2\pi\mu_0} \left[\frac{x+b}{(x+b)^2+z^2} - \frac{x-b}{(x-b)^2+z^2} \right];$ $H_z = \frac{\sigma}{2\pi\mu_0} \left[\frac{z}{(x+b)^2+z^2} - \frac{z}{(x-b)^2+z^2} \right];$ $H_x = \frac{D}{2\pi\mu_0} \frac{z^2-x^2}{(z^2+x^2)^2};$ $H_z = \frac{D}{2\pi\mu_0} \frac{2zx}{(z^2+x^2)^2}$
4	 <p>Поле двух точечных зарядов</p> <p>Поле диполя: $b \rightarrow 0, q \rightarrow \infty,$ $\lim bq = D$</p>	$H_x = \frac{q}{2\pi\mu_0} \left\{ \frac{x+b}{\left[(x+b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} - \frac{x-b}{\left[(x-b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} \right\};$ $H_y = \frac{q}{2\pi\mu_0} \left\{ \frac{y}{\left[(x+b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} - \frac{y}{\left[(x-b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} \right\};$ $H_z = \frac{q}{2\pi\mu_0} \left\{ \frac{z}{\left[(x+b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} - \frac{z}{\left[(x-b)^2 + y^2 + z^2 \right]^{3/2}} \right\};$ $H_x = \frac{D}{2\pi\mu_0} \frac{y^2+z^2-2x^2}{(x^2+y^2+z^2)^{5/2}};$ $H_y = \frac{D}{2\pi\mu_0} \frac{2xy}{(x^2+y^2+z^2)^{5/2}};$ $H_z = \frac{D}{2\pi\mu_0} \frac{2xz}{(x^2+y^2+z^2)^{5/2}}$

Продолжение табл. 2.1

№ п/п	Объект	Формулы для расчета
5	 <p>Две равномерно заряженные грани с поверхностной плотностью σ_0</p>	$H_x = \frac{\sigma_0}{4\pi\mu_0} \left[\operatorname{arctg} \frac{h(x+b)}{(x+b)^2 + z(z+h)} - \operatorname{arctg} \frac{h(x-b)}{(x-b)^2 + z(z+h)} \right];$ $H_z = \frac{\sigma_0}{4\pi\mu_0} \ln \frac{[(x-b)^2 + z^2] [(x+b)^2 + (z+h)^2]}{[(x+b)^2 + z^2] [(x-b)^2 + (z+h)^2]}$
6	 <p>Цилиндрический дефект в безграничном пространстве</p>	$H_x = H_0 + H_{dx}, H_z = H_{dz}.$ $\left. \begin{aligned} H_{dx} &= H_0 a^2 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{z^2 - x^2}{(z^2 + x^2)^2} \\ H_{dz} &= H_0 a^2 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{2yx}{(z^2 + x^2)^2} \end{aligned} \right\} r > a$
7	 <p>Бесконечно тонкий соленоид с током</p>	$H_x = \frac{M_n}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(x+b)h}{(x-b)^2 + z(z+h)} - \operatorname{arctg} \frac{(x-b)h}{(x-b)^2 + z(z+h)} \right];$ $H_z = \frac{M_n}{2\pi} \ln \frac{[(x+b)^2 + (z+h)^2] [(x-b)^2 + z^2]}{[(x+b)^2 + z^2] [(x-b)^2 + (z+h)^2]};$ $M_n = i_n = (\mu - 1)H_{0n}$
8	 <p>Виток с током</p>	$H_x = \frac{i_n \cdot 2b}{2\pi} \left[\frac{z}{z^2 + x^2} - \frac{z+h}{(z+h)^2 + x^2} \right];$ $H_z = \frac{i_n \cdot 2b}{2\pi} \left[\frac{x}{z^2 + x^2} - \frac{x}{(z+h)^2 + x^2} \right];$ $i_n = M_n = (\mu - 1)H_{0n}$

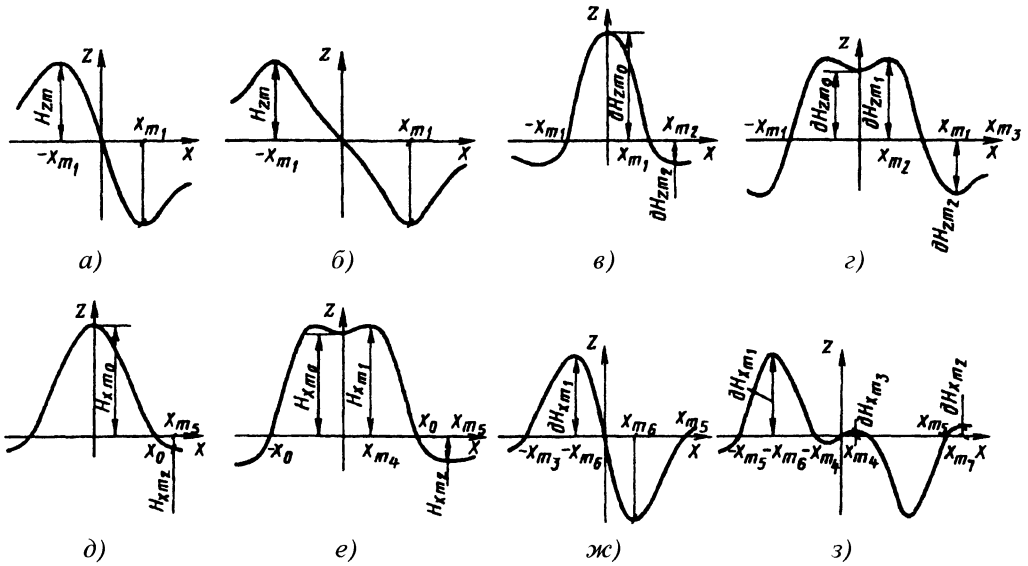


Рис. 2.1. Составляющие H_x и H_z магнитного поля рассеяния дефекта и их основные производные (кривые сигналов преобразователей для двух значений межполюсного расстояния диполя):

а, в, д, ж – докритического; б, г, е, з – сверхкритического

На основании анализа формул можно сделать ряд важных выводов. Например, сравнив формулы 6 и 3, легко убедиться, что поле цилиндрической полости соответствует полю дипольной нити, расположенной на оси полости. Радиус полости не влияет на топографию ее магнитного поля рассеяния, а только на значение напряженности этого поля.

Влияние границ детали можно учесть с помощью метода зеркальных отображений ($\mu = \text{const}$) на примере дипольной нити (см. табл. 2.1).

Для расчета поля поверхностных дефектов используют модели диполей (поз. 2–4), из которых наиболее подходящей является модель ленточного диполя (поз. 5), причем грани дефектов могут быть расположены не только параллельно и вертикально, но и под всевозможными углами.

Для поз. 8 (см. табл. 2.1) следует учитывать следующие соотношения:

$$M_n = i_n = 2\sigma_0,$$

где $M_n = (\mu - 1)H_{0n}$ – намагниченность на границе металл–воздух; i_n – соленоидный ток; σ_0 – поверхностная плотность магнитных (фиктивных) зарядов; H_{0n} – составляющая приложенного магнитного поля H , нормальная к границе поверхности раздела. При этом

$$\sigma_0 = \sigma_k \frac{h/(2b) + 1}{h/(2b) + \mu};$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\pi} \frac{\mu - 1}{\mu + 1} (M_n + H_{0n}).$$

Это важное для практики магнитной дефектоскопии выражение для поверхностной плотности магнитных зарядов, учитывающее глубину и ширину дефекта, а также магнитные свойства среды μ , в которой находится дефект бесконечной протя-

женности. Заслуживает внимания также модель Ферстера, записанная по аналогии с магнитным полем витка с током:

$$H_x = \frac{H_s}{\pi} 2b \left[\frac{z}{x^2 + z^2} - \frac{z+h}{x^2 + (z+h)^2} \right];$$

$$H_z = \frac{H_s}{\pi} 2b \left[\frac{z}{x^2 + z^2} - \frac{x}{x^2 + (z+h)^2} \right].$$

Типичный вид составляющих магнитного поля рассеяния поверхностного дефекта (H_x и H_z) и их производных показан на рис. 2.1.

ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под *первичным преобразователем* магнитного поля понимается устройство, служащее для преобразования параметров магнитного поля в электрический сигнал. В первичных преобразователях, как правило, происходит изменение физической природы сигнала. Если входным сигналом служит сама физическая величина, подвергаемая преобразованию (Φ , B , H), то выходным – уже другая физическая величина, функционально связанная с первой.

Унифицированным выходным сигналом первичного преобразователя является электрический сигнал, в котором могут быть использованы различные параметры: амплитуда, частота, фаза и т.д. В преобразователях возможно также использование операций модуляции и демодуляции.

В магнитной диагностике наиболее перспективно применение первичных преобразователей магнитного поля, классификация которых приведена на рис. 3.1. Все преобразователи подразделяются на индукционные, феррозондовые, гальваномагнитные и сверхпроводниковые.

Индукционные преобразователи являются преобразователями пассивного типа. В них в качестве чувствительного элемента используется катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником или без него. При этом выходным сигналом является ЭДС движения, наводимая в катушке и пропорциональная скорости изменения магнитного поля, пронизывающего катушку.

Феррозондовые преобразователи являются преобразователями активного типа и содержат ферромагнитные сердечники стержневого или кольцевого типа. Выходная ЭДС в них возникает за счет изменения во времени магнитных параметров сердечников при одновременном воздей-

ствии на них регистрируемого магнитного поля и переменного поля возбуждения. При этом регистрируемое магнитное поле осуществляет модуляцию какого-либо магнитного параметра сердечников (Φ , B , H , μ). Феррозондовые преобразователи подразделяются на трансформаторные и однообмоточные.

Отдельную группу составляют *гальваномагнитные* преобразователи магнитного поля, в которых изменение внутренних параметров при воздействии внешних магнитных полей осуществляется за счет искривления траектории движения носителей заряда, изменения их концентрации и т.д. К ним относятся преобразователи Холла, магниторезистивные, гальваномагниторекombинационные, магнитодиодные, магнитотриодные, а также преобразователи на z -элементах, имеющие значительные перспективы практического использования.

Это объясняется тем, что подобные преобразователи микроскопических размеров можно изготавливать автоматизированным путем по интегральной технологии, что имеет большое значение при изготовлении многоэлементных матричных преобразователей для визуализации магнитных полей.

В магнитной диагностике возможно также применение преобразователей *на магнитоуправляемых контактах*, использующих силы притяжения магнитопроводов под воздействием магнитного поля, которые выполняют одновременно и функции электрических контактов.

Основными характеристиками преобразователей, использующихся в магнитных интроскопах, являются чувствительность, разрешающая способность и динамический диапазон. Под *чувствительностью* преобразователя понимается

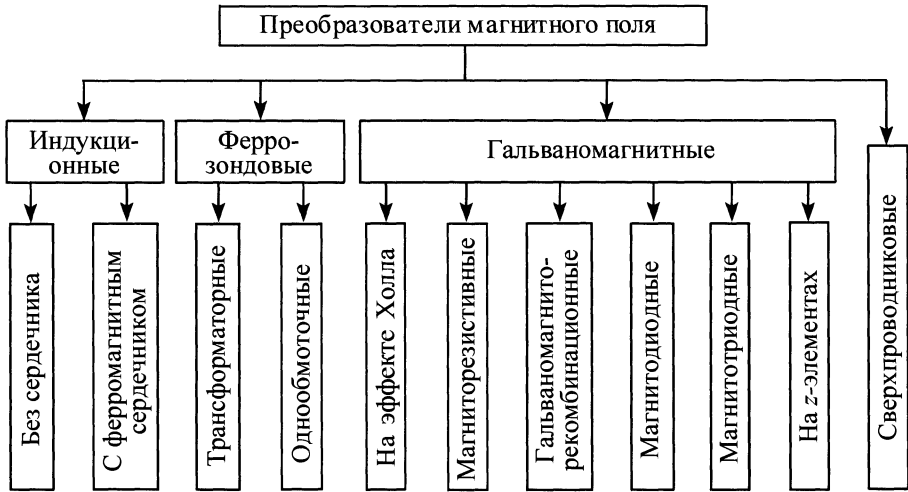


Рис. 3.1. Классификация преобразователей магнитного поля

возможность преобразования им регистрируемого магнитного поля в форму, удобную для дальнейшего использования. Численной мерой чувствительности является коэффициент преобразования, характеризующий отношением значения сигнала на выходе преобразователя к его значению на входе. В качестве входных сигналов преобразователя могут быть использованы магнитный поток, магнитная индукция, напряженность магнитного поля и др.

Разрешающая способность преобразователей магнитного поля, применяемых в магнитной диагностике, характеризует их способность создавать электрические сигналы от магнитных полей рассеяния с малыми геометрическими размерами, соответствующих микроскопическим дефектам. Указанный параметр определяется геометрическими размерами самого преобразователя, которые, например, для преобразователей Холла могут достигать 10×10 мкм.

Динамический диапазон магнитных полей, в котором преобразователь должен устойчиво работать, составляет в магнитной диагностике трубопроводов примерно $1 \dots 200$ А/см. При этом на преобразова-

тель воздействуют как поля рассеяния от дефектов, так и поля подмагничивания от намагничивающих устройств.

3.2. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

3.2.1. Пассивные индукционные преобразователи

Принцип действия пассивных индукционных преобразователей основан на законе электромагнитной индукции Фарадея:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.1)$$

где $\Psi = w\Phi$ – потокосцепление катушки преобразователя; w – число витков катушки.

Пассивный индукционный преобразователь представляет собой катушку с сердечником или без сердечника, которая движется с некоторой скоростью v в неоднородном магнитном поле.

ЭДС, наводимая в катушке,

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} v = -w\mu_0 S \cos\theta \frac{dH_1}{dt}, \quad (3.2)$$

где S – площадь сечения сердечника или среднего витка преобразователя без сердечника, м^2 ; θ – угол между осью катушки и вектором напряженности магнитного поля; H_1 – напряженность магнитного поля в местах расположения катушки, А/м .

Выходной сигнал пассивного преобразователя с сердечником

$$e_c = -Sw \frac{\mu}{1 + N_p(\mu - 1)} \frac{dH}{dt}. \quad (3.3)$$

Коэффициент преобразования такого преобразователя зависит от коэффициента размагничивания N_p , т.е. от размеров и формы сердечника.

При наличии сердечника магнитная проницаемость тела

$$\mu_T = \frac{\mu_r}{1 + [1 + 1/\gamma^2 (1/\gamma^3 - 1/\gamma) \arctg \gamma]}, \quad (3.4)$$

где $\gamma = \sqrt{1 - (d/L)^2}$; d – диаметр сердечника, м ; L – длина сердечника, м .

Конструктивно индукционные преобразователи магнитного поля представляют собой катушки соответствующих размеров и подходящей конфигурации, с сердечниками или без них, движущиеся с достаточной скоростью вблизи поверхности труб. К числу их преимуществ относится возможность изготовления и использования преобразователей с очень большой шириной полосы, контролируемой одним преобразователем (рис. 3.2), использующихся в магнитной диагностике труб и листов. Катушка преобразователя в этом случае должна располагаться как можно ближе к поверхности трубы и иметь небольшую толщину. Чувствительность пассивного преобразователя выбирают исходя из заданного рабочего диапазона измерительного устройства и шумов усилительного каскада, с которым непосредственно согласуется преобразователь.

Эффективные способы повышения чувствительности – увеличение числа витков катушки преобразователя и использование сердечников из высокопроницаемых

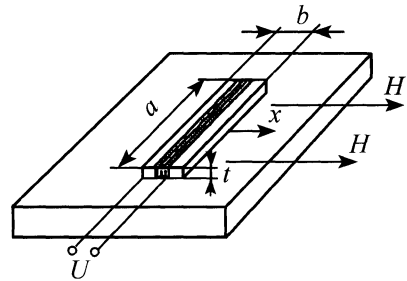


Рис. 3.2. Пассивный индукционный преобразователь

материалов (феррита, пермаллоя и т.д.). Однако при этом необходимо учитывать, что увеличение числа витков вызывает повышение выходного индуктивного сопротивления; применение сердечников с высокой проницаемостью приводит к непостоянству чувствительности преобразователя и ее зависимости от воздействия постоянных магнитных полей. Улучшить параметры пассивных индукционных преобразователей можно при изготовлении их печатным способом, методом фотографирования или вакуумного напыления. Получение необходимого числа витков достигается и в многослойных структурах, технология которых достаточно хорошо разработана, а процесс изготовления может быть автоматизирован.

Сравнительно просто можно получить миниатюрные обмотки диаметром $0,8 \dots 1 \text{ мм}$ с расстоянием между витками примерно 50 мкм . Недостатком пассивных индукционных преобразователей является зависимость чувствительности от различных подмагничивающих полей, образующихся в установках магнитного поля, а также зависимость выходного сигнала преобразователя от скорости изменения напряженности изменяемого магнитного поля. Сигнал, получаемый от катушки, возрастает при введении в нее ферромагнитного сердечника. Размер сердечника в направлении вектора намагничивающего поля, обозначенный на рис. 3.2 буквой b , будем считать шириной сердечника, размер a – длиной сердечника. Длина сердеч-

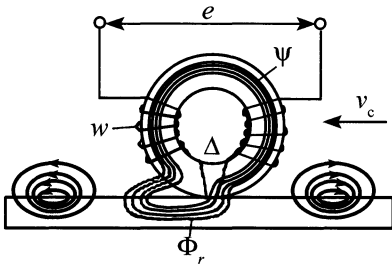


Рис. 3.3. Кольцевая магнитная головка

ника a определяет ширину полосы контроля. Ширина b не должна превышать размеры области, на протяжении которой минимальный дефект создает заметное возрастание напряженности магнитного поля рассеяния. Длина сердечника a определяется требованиями к ширине полосы контроля.

Для считывания магнитных полей можно применять индукционные магнитные головки. Существует несколько разновидностей головок. Наиболее широкое применение получили кольцевые магнитные головки, обладающие большим коэффициентом преобразования (рис. 3.3). Они состоят в основном из сердечника и обмотки.

Сердечник головки собирается из двух полуколец, склеенных в пакеты из тонких (0,1 ... 0,2 мм) пластин магнитомягкого материала с очень высокой магнитной проницаемостью ($\mu_r = 50\,000 \dots 100\,000$ Гн/м). Обычно в качестве такого материала используют железоникелевые сплавы 50НХС, 80НХС, 79НМА и др. В отдельных случаях в головках применяют ферритовые сердечники. Толщину набора сердечника выбирают в зависимости от назначения головки.

Обмотка головки состоит либо из двух катушек с большим числом витков тонкого эмалированного провода, надетых на каждое полукольцо сердечника и соединенных последовательно, либо из одной общей катушки. Между передними утонченными концами сердечника головки имеется немагнитный рабочий зазор,

образованный прокладкой из тонкой (5 ... 20 мкм) бронзовой фольги. Вторые концы полуколец сердечника плотно подгоняются один к другому.

Индукционные магнитные головки предназначены для преобразования магнитных полей в электрические сигналы и находят применение в магнитографической дефектоскопии.

Принцип работы индукционной магнитной головки заключается в замыкании большей части внешнего магнитного потока Φ_r , создаваемого намагниченными отпечатками на трубе, через ферромагнитный сердечник головки. Полусные грани рабочего зазора головки должны быть ориентированы в направлении поляризации граней дефекта.

Замыкание, шунтирование внешнего магнитного потока трубы через сердечник головки обуславливаются, с одной стороны, большим магнитным сопротивлением R_0 ее рабочего зазора и, с другой, — весьма малым магнитным сопротивлением R_m сердечника, изготовленного из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Магнитное потокоцепление Ψ , замыкающееся в процессе сканирования через сердечник головки, пронизывает витки обмотки и возбуждает в ней ЭДС электромагнитной индукции. Чтобы получить большую отдачу сигналов, стремятся обеспечить как можно больший коэффициент шунтирования головки. Под коэффициентом шунтирования A обычно понимают отношение части потокоцепления Ψ трубы, замыкающегося через сердечник головки и сцепляющегося с витками ее обмотки, к остаточному потоку Φ_r трубы или отношению магнитного сопротивления R_0 рабочего зазора головки к сумме магнитных сопротивлений сердечника R_m и зазора R_0 :

$$A = \Psi/\Phi_r = R_0/(R_m + R_0),$$

откуда

$$\Psi = R_0/(R_m + R_0) = \Phi_r A. \quad (3.5)$$

Зависимость ЭДС, возникающей при сканировании в обмотке головки, в первом

приближении можно выразить как

$$e = w \frac{d\Phi_r}{dt} = w\Phi_r A \frac{v_c}{\Delta} \sin\left(\frac{\pi \Delta}{\lambda}\right) \cos(\omega t), \quad (3.6)$$

где w – число витков обмотки; v_c – скорость сканирования; Δ – немагнитный рабочий зазор; λ – длина записанных на трубе магнитных диполей в направлении поляризации.

Из выражения (3.6) следует, что при постоянстве коэффициента шунтирования, числа витков обмотки и скорости сканирования электрические сигналы, возникающие в головке, зависят главным образом от намагниченности отпечатков полей дефектов. Основными показателями индукционных магнитных головок являются ширина рабочего зазора, высота пакета сердечника, число витков обмотки и индуктивность. Ширина рабочего зазора обуславливает частотную характеристику и разрешающую способность магнитных головок. Толщину сердечника головки выбирают в зависимости от ширины считываемой дорожки на трубе. В аппаратуре для магнитной диагностики применяют головки с толщиной сердечника 1 мм.

3.2.2. Магнитоиндукционные преобразователи

Использование магнитомягких материалов в значительной мере определяет важнейшие технико-экономические характеристики соответствующих устройств магнитной диагностики. Еще сравнительно недавно в приборостроении в основном применялись магнитомягкие материалы следующих трех классов:

- электротехнические стали, представляющие собой сплавы железа и кремния и отличающиеся высокой индукцией насыщения B_s ;

- железоникелевые сплавы (пермаллои) с большой магнитной проницаемостью μ и/или прямоугольной петлей гистерезиса;

- магнитные диэлектрики (ферриты), которым присущи малые потери на высоких частотах.

Для магнитных преобразователей находят применение аморфные магнитные сплавы, которые обычно получают путем разлива жидкого металла через сопло в непрерывный вращающийся поток воды, обеспечивающей требуемую скорость охлаждения. Ленты из аморфных магнитных сплавов еще меньшей толщины или из проволок малого диаметра часто получают холодной вальцовкой или протяжкой, после чего обычно требуется отжиг для снятия механических напряжений. Он должен проводиться при температурах меньше температуры рекристаллизации $T_{кр}$. Для проволок отжиг может выполняться пропуском через нее соответствующего тока. Ленты (в частности, для изготовления витых сердечников) после полива часто используют без последующего отжига.

К преимуществам аморфных магнитных сплавов относятся их изотропность, технологичность, механическая прочность, износостойкость, а также возможность изменения в широких пределах магнитных, электрических и механических свойств преобразователей магнитного поля путем соответствующего подбора их химического состава и/или последующей термической, термомагнитной или термо-механической обработки.

Даже серийно выпускаемые аморфные магнитные сплавы массового назначения, в том числе и отечественные, по многим параметрам лучше традиционных магнитомягких материалов.

Например, по удельным потерям в переменных магнитных полях из-за высокого удельного сопротивления ρ аморфные магнитные сплавы намного превосходят электротехнические стали и железоникелевые сплавы той же толщины. Однако электротехнические стали имеют более высокие значения индукции насыщения

B_s , что может иметь существенное значение для мощных намагничивающих устройств.

Аморфные магнитные сплавы поставляются как в виде проволок, лент, так и в форме витых тороидальных сердечников, прошедших заданный режим термо- и термомагнитной обработки.

Магнитоиндукционный эффект открыт лишь недавно в проволоках из аморфных магнитных сплавов. Он заключается в том, что при пропускании высокочастотного тока по отрезку высокопрочной проволоки ток из центральной области проволоки вытесняется к ее наружному диаметру под воздействием вихревых токов. Как следствие, растет активное сопротивление проволоки протекающему току. Кроме того, такая проволока обладает и заметным индуктивным сопротивлением высокочастотному току. Действие вихревых токов пропорционально $(\gamma \mu f)^{0,5}$, где γ – удельная электрическая проводимость материала.

Действуя на проволоку внешним магнитным полем, можно в широких пределах изменять значение μ и, следовательно, ее активное и индуктивное сопротивления, что и названо магнитоиндуктивным эффектом. Проще всего магнитоиндуктивный эффект можно обнаружить по изменению падения напряжения на отрезке аморфной проволоки, по которой протекает высокочастотный ток фиксированной амплитуды, под воздействием внешнего магнитного поля. Магнитоиндуктивный эффект также обнаружен в тонкой магнитной пленке, в том числе нанесенной гальванически на немагнитную проволоку.

На основе отрезка проволоки такого состава диаметром 30 мкм и длиной 1 мм создан магнитоиндукционный преобразователь магнитного поля с номинальной рабочей частотой 220 МГц и чувствительностью порядка $8 \cdot 10^{-6}$ А/см.

Один из наиболее простых и эффективных методов использования магнитоиндукционного эффекта – включение отрезка аморфной проволоки в колебательный контур высокочастотного автогенератора, например, генератора, выполненного на туннельном диоде. При номинальной частоте колебаний 100 МГц чувствительность его к магнитному полю составляет 10 ГГц/Тл. В качестве магнитного проводника используется отрезок ленты из аморфного магнитного сплава длиной 30 мм, шириной 0,1 мм и толщиной 25 мкм, в котором наблюдаются нелинейные зависимости сопротивления R и индуктивности L проводника и частоты f от внешнего поля H_v . С ростом H_v значения R и L сначала увеличиваются, а f уменьшается. При некоторых неодинаковых значениях H_v рост R и L прекращается, и с дальнейшим увеличением H_v значения R и L уменьшаются, а f увеличивается.

Поэтому для получения близкой к линейной зависимости $f(H_v)$ вводится постоянное поле смещения, при котором допустимый диапазон изменения H_v оказывается сильно ограниченным.

Учитывая новизну магнитоиндукционного эффекта и интенсивные исследования в области физики и применения этого эффекта, следует ожидать создания новых аморфных материалов с большим магнитоиндукционным эффектом и разработки принципов его практического применения в магнитной диагностике.

3.3. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

3.3.1. Гальваномагнитные преобразователи, основанные на эффекте Холла и эффекте Гаусса

Характеристики магнитных преобразователей, применяемых в магнитной дефектоскопии, должны удовлетворять следующим требованиям:

Напряженность измеряемого поля, А/см:

наименьшая	10^{-3}
наибольшая	10^3
Минимальная чувствительность, мВ · см/А	2
Инерционность, с	До 10^{-4}
Наибольшие размеры, мм	10^{-3}
Температурная погрешность, %	До 0,01
Рабочий диапазон температур, °С	-30 ... +150

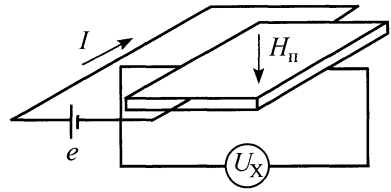


Рис. 3.4. Схема включения преобразователя Холла:

U_x – ЭДС Холла; H_n – вектор напряженности приложенного магнитного поля; e – источник питания

Наиболее широкое применение получили полупроводниковые гальваномагнитные преобразователи, основанные на эффекте Холла и эффекте Гаусса. Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) на боковых гранях пластины.

Эффект Гаусса проявляется в изменении электрического сопротивления пластины. Оба эффекта обусловлены изменением траектории движения заряженных частиц в магнитном поле под действием силы Лоренца $F = -e [v, B]$. Преобразователи выполняют методом фотолитографии толщиной 5 ... 10 мкм.

Чувствительность преобразователя Холла к магнитной индукции S_b определяется при номинальном значении входного тока $I_{ном} = const$ как $S_b = R_{ПХ} I_{ном} \varphi_1 / d$ ($R_{ПХ}$ – постоянная Холла; φ_1 – функция, зависящая от геометрии преобразователя; d – толщина пластины) и для серийно выпускаемых преобразователей составляет 0,03 ... 1 В/Тл, или 0,04 ... 0,12 мВ·см/А. Значение $I_{ном}$ ограничено допустимой температурой перегрева преобразователя. Диапазон измеряемых полей – от 0,1 до 1000 А/см. Интервал рабочих температур также широк и для серийных отечественных преобразователей составляет от -30

до +150 °С. Инерционность элементов Холла – не более 10^{-10} с.

К недостаткам данных преобразователей следует отнести низкую температурную стабильность и большую погрешность вблизи нулевых полей, вызванную наличием градиента температур между его электродами (эффект Пельтье); низкую механическую прочность; погрешность от собственного магнитного поля, создаваемого током (особенно, если вблизи есть ферромагнитные изделия); появляющуюся в неоднородных полях большую величину погрешности от планарного эффекта Холла.

Схема включения преобразователя Холла показана на рис. 3.4.

При пропускании постоянного тока через датчик значение U_x определяется только напряженностью поперечного магнитного поля дефекта. Благодаря именно этому преобразователи Холла широко используются в магнитной диагностике. Так как основные параметры преобразователей Холла улучшаются с ростом подвижности носителей, то для их изготовления используются полупроводники с высокой подвижностью: германий, кремний, арсенид галлия, антимонид индия и др.

На рис. 3.5 показано расположение преобразователей Холла на поверхности ферромагнитного образца для измерения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния от дефекта H_d (H_n – приложенное магнитное поле). Преобразователь Холла имеет не-

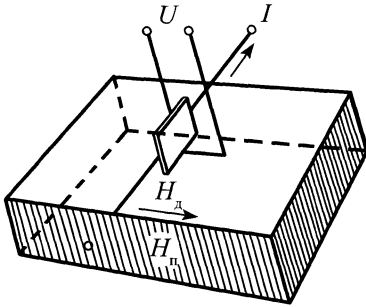


Рис. 3.5. Расположение преобразователя Холла на поверхности образца для измерения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля

большие размеры по сравнению с размерами образца и с достаточной чувствительностью может измерять напряженность магнитного поля во всех точках на поверхности изделия.

Широкое распространение при измерении слабых магнитных полей получили магнитопленочные преобразователи Холла, выполненные на основе пермаллоевой пленки. Напряжение выходного сигнала преобразователя прямоугольной формы, основанного на планарном эффекте Холла,

$$\Delta U = \Delta p_s I \sin(2\varphi) H / (2h), \quad (3.7)$$

где $\Delta p_s = 6,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см – константа материала; I – сила тока; φ – угол между векторами намагниченности и тока; h – толщина преобразователя Холла.

Преобразователь выполняется из анизотропной пермаллоевой пленки обычно в виде квадрата (или круга), размеры сторон (или диаметр) которого примерно равны 50 мкм, а толщина составляет несколько десятков нанометров. Две пары взаимно перпендикулярных электродов служат для подачи тока и съема сигнала. Поле рассеяния изменяет направление вектора намагниченности относительно тока и вызывает появление ЭДС. В отсутствие поля рассеяния поле анизотропии возвращает вектор намагниченности в исходное состояние. У таких преобразова-

телей, имеющих диаметр 50 мкм, толщину 30 нм, входное и выходное сопротивления 10 ... 15 Ом, выходной сигнал составляет 0,9 мВ при силе тока 20 мА.

Недостатком этих преобразователей является более сложное изготовление четырех контактов по сравнению с двумя у магниторезистивных преобразователей.

Пленочные преобразователи обладают большей чувствительностью, чем кристаллические. Быстрое распространение преобразователей Холла обуславливается их многочисленными преимуществами, важнейшие из которых следующие:

- преобразователь Холла является статическим элементом, что дает ему преимущество перед индукционным, измеряющим магнитное поле только в момент перемещения;
- малые размеры (10 × 10 мкм) и большая надежность в работе.

Основные характеристики преобразователей Холла, выпускаемых в настоящее время в России и за рубежом, приведены в табл. 3.1.

Другой тип полупроводникового гальваномагнитного преобразователя основан на изменении электрического сопротивления под действием магнитного поля (эффект Гаусса). Увеличение электрического сопротивления под действием магнитного поля происходит как в случае, когда вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно к направлению протекания тока в полупроводниковой пластине (поперечный эффект магнитосопротивления), так и в случае, когда вектор магнитной индукции параллелен направлению тока (продольный эффект магнитосопротивления). Однако изменение сопротивления при продольном эффекте незначительно. Физически магниторезистивный эффект обусловлен искривлением траектории носителей заряда (электронов проводимости и дырок) в магнитном поле под действием силы Лоренца относительно направления возбуждающего электрического поля.

3.1. Технические характеристики преобразователей Холла

Тип (фирма)	Средняя чувствительность при номинальном управляющем токе, В/Тл	Сила номинального управляющего тока, мА	Входное (выходное) сопротивление, кОм	Диапазон измерений, мТл	Температурный коэффициент, %/°C	
					чувствительности	сопротивления
ФГУП "НИИП"	0,2 ... 1,0	1,0	≤ 3,0 (≤15,0)	± 1000	–	–
KSY 10 (Siemens)	0,85 ... 1,15	5,0	0,9 ... 1,2 (0,9 ... 1,2)	± 1000	–0,05	0,10 ... 0,18
KSY 14 (Siemens)	0,95 ... 1,30	5,0	0,9 ... 1,2 (0,9 ... 1,2)	± 1000	–0,07... –0,03	0,10 ... 0,18
KSY 44 (Siemens)	1,05 ... 1,61	7,0	0,6 ... 0,9 (1,0 ... 1,5)	±1000	–0,03	+0,30
HAL400 (Micronas Intermetall)	33 ... 50 (программируется)	14,5	–	± 75	± 0,02	–
HAL800 (Micronas Intermetall)	13 ... 67 (встроенный усилитель)	7,0	–	± (30 ... 150) (программируется)	Программируется	–
UGN3503 (Allegro)	7,5 ... 17,2 (встроенный усилитель)	9,0	–	± 90	–	–
A3507 A3508 (Allegro)	17 ... 33 (встроенный усилитель)	≤ 10,0	(2,5)	–	–	–
SS49/SS19 (Honeywell)	–	4,0	–	± 100	–	–
SS94A Series (Honeywell)	5 ... 250 (встроенный усилитель)	13	–	± (10 ... 500)	± 0,02	–
AY22151 (Analog Device)	Программируется	5	–	0... 1000, или ± 500 макс.	Программируется	–

Чувствительность достигает максимального значения в полях $0,15 \dots 0,25$ Тл ($1200 \dots 2000$ А/см), а в области малых полей менее 10 мТл (80 А/см) чувствительность стремится к нулю. При этом магниторезистивный эффект нечувствителен к знаку магнитного поля. Диапазон рабочих температур магниторезисторов составляет $-85 \dots +60$ °С.

Преимуществом преобразователей Гаусса можно считать простейшую конструкцию с минимально возможным числом электродов. Наименьшие размеры магниторезисторов составляют около 50 мкм. К недостаткам следует отнести низкую чувствительность (меньшую, чем у преобразователей Холла), значительную нелинейность и температурную нестабильность; низкие метрологические показатели ограничивают применение полупроводниковых магниторезисторов в качестве прецизионных измерителей магнитного поля.

3.3.2. Гальваномагнито-рекомбинационные преобразователи

Более чувствительными преобразователями являются гальваномагнито-рекомбинационные (ГМР). Их действие основано на магнитоконцентрационном эффекте в собственном полупроводнике, особенность которого состоит в том, что концентрация электронов равна концентрации дырок. В условиях термодинамического равновесия в полупроводнике наряду с генерацией пар электрон–дырка происходит и противоположный процесс – рекомбинация носителей тока. Эти процессы происходят непрерывно, и для каждого значения температуры устанавливается соответствующая равновесная концентрация электронов. В отличие от магниторезистивного элемента ГМР-преобразователь обладает чувствительностью к знаку магнитного поля. Чувствительность таких преобразователей на два порядка превосходит чувствительность элементов Холла и составляет 80 В/Тл (10 мВ · см/А). Подбором нагрузочного резистора, вклю-

ченного последовательно с преобразователем, можно добиться очень малого температурного коэффициента в рабочем диапазоне температур от -20 до $+40$ °С. Рабочий диапазон температур, в котором допустима эксплуатация ГМР-преобразователей, составляет $-60 \dots +100$ °С. Наименьшие размеры преобразователя – $2 \times 0,5$ мм. Преобразователи с наибольшей чувствительностью имеют длину порядка 10 мм. К их недостаткам следует отнести достаточно крупные размеры (низкая пространственная разрешающая способность), большую инерционность (10^{-2} с).

Чаще всего для изготовления ГМР-преобразователей используют германий, обладающий достаточно высокой подвижностью носителей заряда и длиной диффузионного смещения около 1 мм.

Схема включения ГМР-преобразователя приведена на рис. 3.6, а. Значение нагрузочного сопротивления R_n определяет режим работы преобразователя. Если сопротивление R_n примерно в 10 раз превышает сопротивление ГМР-преобразователя при отсутствии магнитного поля R_r , то последний работает в режиме питания от источника тока ($I_1 = \text{const}$).

Схема обеспечивает режим максимальной магнитной чувствительности ГМР-преобразователя. Можно так подобрать значение сопротивления нагрузки $R_n = R_{n \text{ опт}}$, что будет обеспечиваться режим работы схемы с минимальным значением температурного коэффициента магнитной чувствительности. При этом

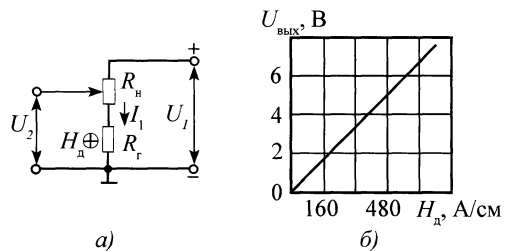


Рис. 3.6. Схема включения (а) и зависимость выходного сигнала от напряженности магнитного поля (б) ГМР-преобразователя

$R_T/R_{H\text{ опт}} = 2,5$. На рис. 3.6, б видно, что зависимость выходного напряжения от напряженности магнитного поля при $I_1 = \text{const}$ линейна.

Преимуществом ГМР-преобразователей является линейность зависимости $U_{\text{вых}} = f(H_d)$ в слабых полях, что выгодно отличает их от преобразователей магнитосопротивления. Кроме того, чувствительность их значительно выше, чем у преобразователей Холла.

3.3.3. Полупроводниковые преобразователи на основе магнитодиодного эффекта

Высокой чувствительностью обладают полупроводниковые преобразователи на основе магнитодиодного эффекта. *Магнитодиодным эффектом* принято называть изменение электрического сопротивления полупроводникового диода с длинной базой, включенного в прямом направлении в результате воздействия на диод поперечного магнитного поля. Для достижения высокой чувствительности магнитотранзисторы изготавливаются с двумя коллекторами (рис. 3.7.) При включении магнитотранзистора по схеме с общим эмиттером и нагрузочными резисторами в цепях коллекторов (мостовая схема) в отсутствие магнитного поля инжектированные эмиттером носители заряда (дырки) примерно поровну распределяются между коллекторами. В поперечном магнитном поле происходит перераспределение инжектированных носителей заряда между коллекторами, при этом ток коллектора $K2$ увеличивается, а ток коллектора $K1$ уменьшается, что вызывает разбаланс моста. Магнитное поле, наряду с эффектом перераспределения носителей между коллекторами, уменьшает эффективную толщину базы, если ток коллектора $K2$ увеличивается, и соответственно увеличивает толщину базы для коллектора $K1$. При изменении направления магнитного поля изменяется знак напряжения между коллекторами. Изменение эффективной

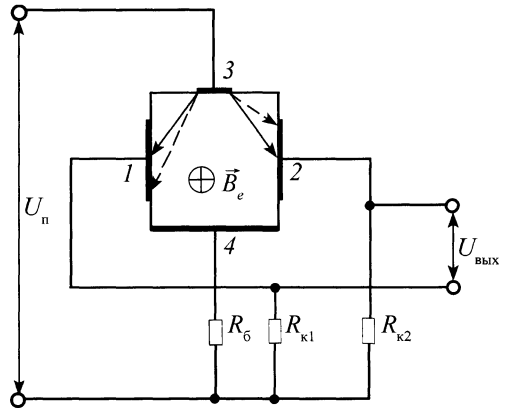


Рис. 3.7. Схематическое изображение двухколлекторного магнитотранзистора и его схема включения:

1, 2 – первый и второй коллекторы;
3 – эмиттер; 4 – база

толщины базы дополнительно увеличивает ток коллектора $K2$, а также уменьшает ток коллектора $K1$. Это приводит к дополнительному росту магниточувствительности. Для транзистора, изготовленного из германия, размерами $1 \times 1 \times 4$ мм чувствительность составляла (при силе тока эмиттера 1 мА) 200 ... 400 В/Тл (25 мВ · см/А).

Наименьшие размеры магнитотранзисторов – 0,1 мм. Быстродействие биполярных магнитотранзисторов не выше, чем у магнитодиодов. Диапазон измеряемых полей, как и у магнитодиодов, – от 1 до 1000 А/см и более.

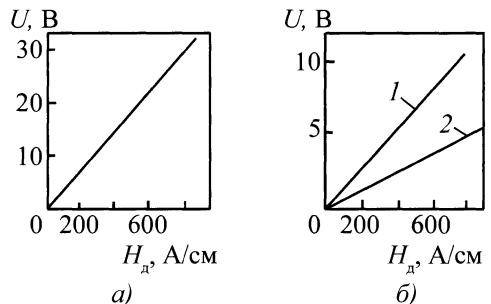


Рис. 3.8. Зависимость напряжения между коллекторами от напряженности магнитного поля для германиевого (а) и кремниевого (б) магнитотранзисторов:

1 – $I_1/I_{61} = 0,25$; 2 – $I_1/I_{61} = 1$

В настоящее время кремниевые двухколлекторные магниторезисторы с горизонтальными коллекторами имеют магниточувствительность в 10 раз выше, чем преобразователи Холла. За счет использования более короткой базы их предельная частота достаточно велика (до 100 МГц), большая концентрация легирующей примеси обеспечивает и высокую термостабильность ($0,03 \text{ \%}/^\circ\text{C}$). Чувствительность экспериментальных отечественных кремниевых двухколлекторных магнитотранзисторов с вертикальными коллекторами на один-два порядка выше, чем чувствительность двухколлекторного магнитотранзистора с горизонтальными коллекторами.

Одним из методов повышения магниточувствительности может быть увеличение напряженности электрического поля в базе двухколлекторного магнитотранзистора. Однако простым увеличением тока эмиттера этого не достигается, поскольку с ростом тока эмиттера увеличивается концентрация носителей заряда вблизи него, и напряженность электрического поля в этой области увеличивается слабо. Напряженность электрического поля в базе удобнее регулировать с помощью расположенного вблизи эмиттера дополнительного омического контакта. Для этого используется планарная структура двухколлекторного магнитотранзистора.

Изменяя ток через базовые электроды, можно устанавливать необходимые значения электрического поля в базе. На рис. 3.8 показана экспериментальная зависимость напряжения между коллекторами такого двухколлекторного магнитотранзистора от напряженности магнитного поля для разных соотношений токов через эмиттер и прилегающий базовый контакт (I_3/I_{61}).

3.3.4. Магнитодиоды

В качестве магнитодиодов используются несимметричные p^+-n - или n^+-p -переходы с длинной базой, т.е. базой, длина ко-

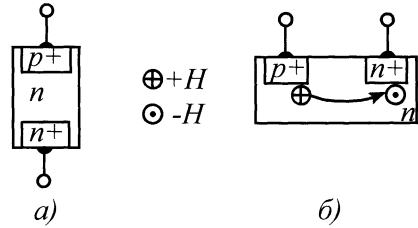


Рис. 3.9. Конструкции магнитодиодов

торой больше длины диффузионного смещения неосновных носителей заряда.

В настоящее время применяют две конструкции магнитодиодов: *торцевая* (рис. 3.9, а) и *планарная* (рис. 3.9, б). При массовом производстве торцевых магнитодиодов трудно осуществить обработку поверхности только одной боковой грани, поэтому все грани обрабатывают одинаково. Сопротивление таких магнитодиодов при обоих направлениях магнитного поля растет одинаково. В планарной конструкции магнитодиодов целесообразно увеличивать скорость рекомбинации носителей заряда на стороне пластины, противоположной от контактов. В этом случае при полярности магнитного поля $+H$ инжектированные носители отклоняются к верхней грани пластины, сокращается их траектория движения и увеличивается время жизни.

Оба эти эффекта приводят к уменьшению сопротивления магнитодиода. При направлении магнитного поля $-H$ сопротивление увеличивается. Это позволяет использовать магнитодиод для определения направления магнитного поля. Если же область с высокой скоростью рекомбинации расположена на верхней стороне пластины, то эффекты изменения длины траектории и времени жизни будут частично компенсировать друг друга и магниточувствительность значительно уменьшится.

Вольт-амперные характеристики германиевого магнитодиода с областью высокой скорости рекомбинации приведены на рис. 3.10, а.

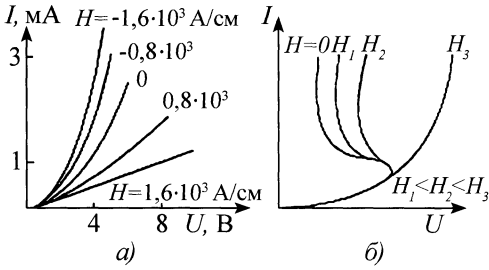


Рис. 3.10. Вольт-амперные характеристики магнитодиодов:
 а – германиевый магнитодиод;
 б – s-магнитодиод

Преимуществом германиевых магнитодиодов является высокая чувствительность при низких напряжениях (до 2 В), недостатком – зависимость чувствительности от температуры, причем для уменьшения чувствительности в 2 раза достаточно повысить температуру от 30 до 50 °С.

Концентрация собственных носителей в кремнии на два-три порядка меньше, чем в германии. Это позволяет во столько же раз уменьшить концентрацию основных носителей и повысить магниточувствительность.

Известны s-магнитодиоды, имеющие вольт-амперную характеристику s-типа и

обладающие отрицательным дифференциальным сопротивлением. В качестве s-магнитодиодов используют s-диоды, в которых образование обратной связи происходит за счет роста времени жизни и подвижности носителей заряда, так как именно эти параметры полупроводника наиболее чувствительны к магнитному полю. Типичная характеристика s-магнитодиода показана на рис. 3.10, б.

3.3.5. Магнитотранзисторы

Однопереходный транзистор состоит из стержня полупроводника с омическими контактами на концах и p-n-переходом между ними (рис. 3.11, а). Любой однопереходной транзистор можно использовать в качестве магниточувствительного прибора.

Под действием электрического поля в базе, создаваемого напряжением U_{66} , инжектированные дырки уносятся в нижнюю часть базы, вследствие чего ее сопротивление еще больше уменьшается. Снижение сопротивления нижней части базы приводит к дальнейшему уменьшению напряжения U_1 и увеличению U_{pn} , в результате чего инжекция носителей и ток через p-n-переход продолжают расти. Та-

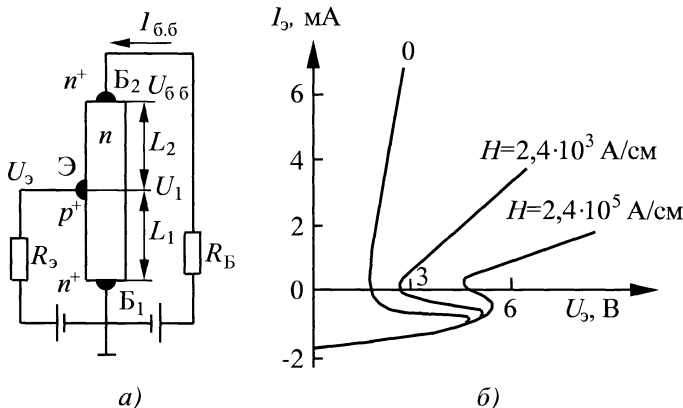


Рис. 3.11. Схема включения (а) и вольт-амперные характеристики (б) однопереходного магниторезистора

кой самоускоряющийся процесс приводит к лавинному нарастанию тока через $p-n$ -переход и уменьшению падения напряжения на последовательно включенных сопротивлениях $p-n$ -перехода и нижней части базы, причем нагрузочный резистор во входной цепи должен быть больше входного сопротивления однопереходного транзистора. Входная характеристика однопереходного транзистора относится к s -типу. Ее существенным отличием от аналогичных характеристик других приборов, например s -диода, является то, что включение эмиттера происходит при практически нулевых токах эмиттера.

3.3.6. Полевые магнитотранзисторы

Для увеличения чувствительности преобразователей Холла необходимо уменьшить их толщину. Однако при этом существуют ограничения, обусловленные как технологическими трудностями получения тонких образцов, так и тем, что при малых толщинах растет рассеивание носителей заряда на поверхности, а это приводит к снижению их подвижности. Эти трудности можно уменьшить путем применения *полевого эффекта* для изменения толщины полупроводника.

При помещении любого полевого транзистора в поперечное магнитное поле в его канале возникает электрическое поле Холла, как и в полупроводниковом стержне с двумя омическими контактами на

концах. Полевой магнитотранзистор отличается от обычного лишь тем, что в его канале имеются дополнительные боковые омические контакты для вывода ЭДС Холла.

На рис. 3.12 показана структура МДП-магнитотранзистора с каналом p -типа. При работе транзистора в режиме обеднения канала толщина канала d минимальна вблизи стока C , так как между затвором $З$ и этой частью канала действует напряжение, равное сумме напряжений затвора $U_з$ и стока U_c . Вблизи истока $И$ напряжение между затвором и каналом равно $U_з$, поэтому толщина канала здесь больше. Напряжению Холла U_x максимально в том месте, где d минимально. Следовательно, холловские контакты имеет смысл располагать вблизи стока. Увеличивая отрицательное напряжение на затворе, можно уменьшать d до очень малых значений и таким образом увеличивать U_x .

Чувствительность кремниевых МДП-магнитотранзисторов с каналом p -типа при $I_c = 0,1$ мА равна 400 В/Тл, что в 5 ... 10 раз выше чувствительности преобразователей Холла из аналогичного материала. Несмотря на то, что их чувствительность на два порядка ниже чувствительности биполярных магнитотранзисторов, полевые магнитотранзисторы также находят практическое применение, поскольку имеют меньший уровень собственных шумов.

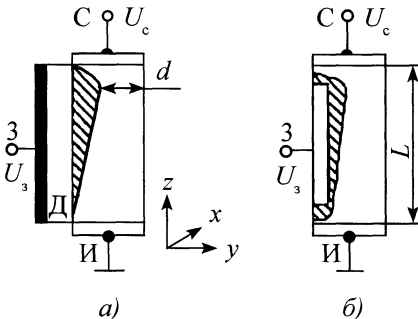


Рис. 3.12. Полевой МДП-магнитотранзистор

3.3.7. z-Элементы

z -Элемент представляет собой $p-n$ -структуру с вольт-амперной характеристикой s -типа. Его изготавливают из кремния с включениями, например фосфора (проводимость n -типа). Алюминий вводят в структуру для создания зоны с проводимостью p -типа. Добавляют также медь, цинк.

z -Элемент подключается к схеме источника постоянного тока через нагрузочное сопротивление R_n , используемое для

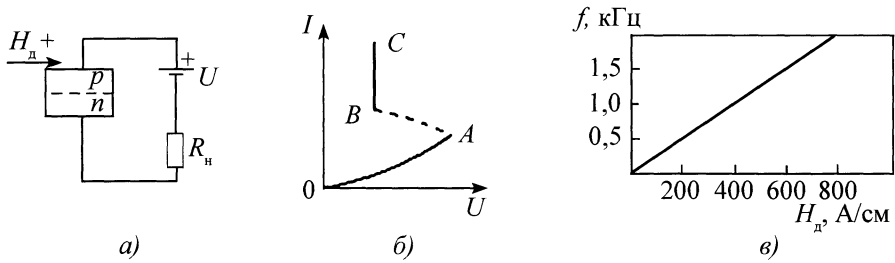


Рис. 3.13. z-Элемент:

a – схема включения; *б* – вольт-амперная характеристика; *в* – зависимость частоты сигнала на выходе от напряженности магнитного поля

ограничения тока и регулирования выходного сигнала. При этом *p-n*-переход включается в прямом положительном направлении (рис. 3.13, *a*).

В начальной части вольт-амперной характеристики (интервал *OA* на рис. 3.13, *б*) сопротивление *z*-элемента велико и ток, протекающий через него, мал. С увеличением напряжения сила тока постепенно возрастает. Напряжение, приложенное к *z*-элементу, падает в основном на участке *n*-зоны с высоким сопротивлением. В некоторые моменты времени напряжение достигает критического значения $U_{кр}$, при котором интенсивность электрического поля увеличивается до значения, соответствующего энергии активации носителей тока.

С ростом напряжения в структуре до значения U_1 (см. рис. 3.13, *б*) увеличивается и интенсивность электрического поля. Рекомбинированные электроны вновь активизируются полем, и процесс шнурования тока начинается заново.

Таким образом, в *z*-элементе периодически изменяется проводимость в зоне шнурования тока и возникают самовозбужденные колебания. Если же число электронов, участвующих в рекомбинации возле границы шнурования тока, превышает число дырок в *p*-области, то шнур становится стабильным и колебания отсутствуют. Однако при использовании внешних воздействий (магнитного, механического, оптического и т.д.), достаточных для репроизводства эквивалентного

числа дырок и электронов возле границы шнурования тока, начинается процесс, сходный с описанным выше, и колебания в *z*-элементе возникают вновь. В обоих случаях частота колебаний из-за шнурования тока зависит от значений параметров внешних воздействий, которые определяют скорость разрушения токового шнура.

z-Элемент может работать в двух режимах: генераторном и принужденном. Преобразование первого режима во второй осуществляется увеличением тока, протекающего через *z*-элемент. Очевидно, что преимуществом генераторного режима является возможность измерения малых значений внешних воздействий. Однако в этом случае диапазон рабочих токов мал, что ограничивает диапазон внешних воздействий. В принужденном режиме параметры внешних воздействий превышают некоторое пороговое значение, которое вызывает колебания в *z*-элементе. Это значение можно существенно уменьшить посредством использования двух воздействий, одно из которых вызывает колебания выходного сигнала, а второе управляет их частотой.

На рис. 3.13, *в* приведена зависимость частоты выходного сигнала от напряженности измеряемого магнитного поля.

3.3.8. Тонкопленочные магниторезисторы

Другим типом преобразователей на тонких металлических ферромагнитных пленках являются магниторезистивные

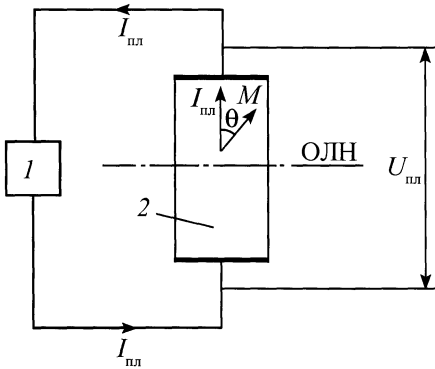


Рис. 3.14. Схематическое изображение магниточувствительного элемента, основанного на магниторезистивном эффекте в ферромагнитных пленках: 1 – источник тока; 2 – ферромагнитная металлическая пленка

преобразователи магнитного поля. Их действие основано на анизотропии удельного электрического сопротивления относительно направления вектора намагниченности в пленке. Если поместить пленочный прямоугольный магниторезистивный элемент (рис. 3.14) во внешнее поле H_e , перпендикулярное к оси легкого намагничивания (ОЛН) и параллельное направлению протекания тока, то падение напряжения на нем будет определяться следующими выражениями:

$$U_{\text{пл}} = I_{\text{пл}} (R_0 + \Delta R_{\text{м}} \cos^2 \theta); \quad (3.8)$$

$$U_{\text{пл}} = I_{\text{пл}} (R_0 + \Delta R_{\text{м}}) H_e \leq H_k,$$

где $I_{\text{пл}}$ – сила тока, протекающего через пленочный элемент; R_0 – сопротивление пленки при взаимно перпендикулярном направлении протекания тока и вектором намагниченности M ; $\Delta R_{\text{м}}$ – максимальное изменение сопротивления пленки в магнитном поле; θ – угол между направлением тока в пленке и вектором намагниченности M ; H_k – напряженность поля одноосной анизотропии, определяемая как $2K/M$ (K – константа анизотропии).

Магниторезистивный эффект в пленках является четным и, следовательно, нечувствителен к знаку поля. Знакочувствительности добиваются, помещая магниточувствительный элемент (МЭ) в поле смещения или изготавливая элемент так, чтобы угол между направлением тока и ОЛН равнялся 45° . Чувствительность типичных пленочных элементов составляет $2500 \text{ мВ} \cdot \text{см/А}$; диапазон измерения от 10^{-4} до 5 А/см . Размеры пленочных преобразователей могут быть очень малыми, порядка 1 мкм при толщине пленки 20 нм . Эксплуатационные качества пленочных МЭ близки к феррозондовым. Это обеспечивается применением для изготовления пленочных МЭ, в основном, металлических сплавов и простейшей конструкцией. Так как перемагничивание многодоменных пленок происходит за несколько наносекунд, то у магниторезистивных элементов инерционность менее 10^{-8} с . Диапазон рабочих температур $-200 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$. Преимущество таких преобразователей состоит в том, что к ним применимы методы интегральной технологии, и их можно органично разместить на одной подложке с другими электронными полупроводниковыми компонентами. К недостаткам следует отнести малый рабочий диапазон напряженности измеряемых полей, высокую температурную погрешность и неоднозначность показаний при наличии компонент внешнего поля как вдоль оси трудного намагничивания, так и вдоль ОЛН. Также отсутствуют технологии получения пленки с точно заданными параметрами.

Для сравнения основные характеристики всех рассматривавшихся в данном разделе компактных твердотельных преобразователей магнитного поля приведены в табл. 3.2. В первой строке таблицы указаны параметры преобразователя, который необходим на современном этапе для измерения топографии поля в магнитных методах контроля.

Знак "+" или "-" соответствует тому, отвечает данный МЭ требуемым характеристикам или нет. Как видно по данным табл. 3.2, наиболее подходящим преобразователем по совокупности характеристик является феррозондовый МЭ. Далее с похожими характеристиками идут магниторезисторы на ферромагнитных пленках. Если бы удалось увеличить диапазон измерения и термостабильность магниторезистивных преобразователей, то они по качеству сравнялись бы с феррозондами, а по потенциальным возможностям в уменьшении размеров и при использовании интегральных технологий превзошли феррозондовые. Следует отметить, что в магниторезистивных преобразователях необходимо устранить еще два недостатка – нечувствительность к знаку поля и неоднозначность магнитосопротивления при наличии компонент поля вдоль трудной и легкой осей намагничивания. Из полупроводниковых преобразователей наиболее подходит преобразователь, основанный на эффекте Холла. Весьма ограниченное применение ввиду большой инерционности и крупных размеров могут найти преобразователи ГМР и полевые транзисторы на их основе.

3.3.9. Магниторезисторы с гигантским магниторезистивным эффектом

В 1988 г. был открыт принципиально новый магниторезистивный эффект, основанный на совершенно ином физическом явлении, чем рассмотренный в предыдущем разделе, и позволяющий получить значительно большее изменение электрического сопротивления тонкопленочной структуры. Он был назван *гигантским магниторезистивным эффектом*.

В несколько упрощенном виде сущность гигантского магниторезистивного эффекта состоит в следующем. Пусть имеется многослойная структура, в которой тонкие слои ферромагнитного металла (ФМ) разделены тонкими слоями немагнитного металла (НМ), обозначенные со-

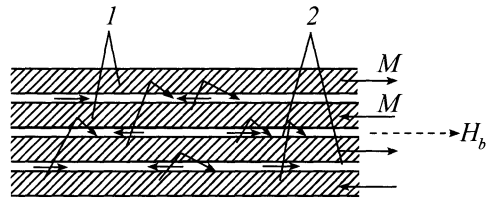


Рис. 3.15. Многослойный магниторезистор с гигантским магниторезистивным эффектом

ответственно 1 и 2 на рис. 3.15. Такие структуры часто обозначают $(\text{ФМ}/\text{НМ})_n$, где ФМ и НМ – наименования соответствующих металлов, а n – число магнитных слоев. В наименование многослойной структуры часто добавляют значения толщин соответствующих слоев t_ϕ и t_n : $(\text{ФМ}, t_\phi/\text{НМ}, t_n)_n$. Для проявления гигантского магниторезистивного эффекта необходимо, чтобы:

1) существовал какой-нибудь способ изменения относительного направления намагниченности в соседних магнитных слоях (например, от антипараллельного, показанного на рис. 3.15, до параллельного);

2) толщина слоев (пленок из ФМ и НМ) была много меньше средней длины свободного пробега электронов проводимости в многослойной структуре.

В структуре $(\text{Fe}/\text{Cr})_n$, в которой впервые был обнаружен гигантский магниторезистивный эффект, первое условие выполнялось за счет обменного взаимодействия между соседними магнитными слоями, благодаря которому в отсутствие внешнего магнитного поля они оказались намагниченными антипараллельно (на рис. 3.15 показано сплошными стрелками). Под действием внешнего достаточно сильного продольного поля H_b (направление показано штриховой линией) все магнитные слои оказываются намагниченными в направлении этого поля. Второе условие выполняется путем выбора толщины слоев обычно в пределах $(10 \dots 30)10^{-10}$ м.

Гигантский магниторезистивный эффект принято характеризовать двумя па-

раметрами. Первый параметр A , который называют *амплитудой* гигантского магниторезистивного эффекта, определяется как отношение изменения сопротивления ΔR многослойной структуры под действием магнитного поля, к ее сопротивлению R_s при насыщении всех магнитных слоев в одном направлении:

$$\Delta R / R_s = A. \quad (3.9)$$

Второй параметр C – нормализованное значение магниторезистивного эффекта, обычно используемое и при оценке A магниторезистивного эффекта, определяется как

$$\Delta R / R_0 = C, \quad (3.10)$$

где R_0 – сопротивление структуры при отсутствии внешнего магнитного поля.

Между этими двумя параметрами существует следующая связь:

$$A = \frac{\Delta R}{R_s} = \frac{\Delta R / R_0}{1 - \Delta R / R_0} = \frac{C}{1 - C}. \quad (3.11)$$

Значение A может изменяться от 0 до ∞ , а C – от 0 до 1. Для многослойных структур типа (Fe/Cr) и (Co/Cu) получены значения $A > 1$, что соответствует $C > 0,5$.

Однако высокие значения A или C еще недостаточны для практического использования таких структур в магниторезистивных преобразователях. Требуется, чтобы такие значения A или C достигались при относительно слабых магнитных полях. Поэтому структуры с гигантским магниторезистивным эффектом характеризуются еще и чувствительностью Q , значение которой может быть равно 2,5 ... 10,5 А/см:

$$Q = \frac{\Delta R / R_s}{\Delta H} = \frac{A}{\Delta H}, \quad (3.12)$$

где ΔH – изменение напряженности магнитного поля, вызывающее данное изменение сопротивления ΔR . В этом случае $\Delta H = H_e$. Одним из главных направлений исследований, проводимых в области гигантского магниторезистивного эф-

фекта применительно к его использованию в преобразователях, является поиск структур и методов, обеспечивающих высокие значения A при малых ΔH .

Для практического использования гигантского магниторезистивного эффекта в преобразователях магнитных полей наряду с другими условиями требуется, чтобы они обладали высокой чувствительностью, определяемой формулой (3.12), т.е. гигантский магниторезистивный эффект должен наблюдаться в относительно слабых магнитных полях.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что гигантский магниторезистивный эффект находится в начальной стадии своего исследования и применения. Следует ожидать появления новых структур и технологий, обеспечивающих более высокие технические и технологические характеристики преобразователей магнитного поля.

3.3.10. Феррозондовые преобразователи магнитных полей

В магнитной дефектоскопии широко применяют различные типы феррозондовых преобразователей. К сожалению, технология их изготовления основана на применении ручного труда и не рассчитана на серийное производство. Не удалось в полной мере обеспечить идентичность преобразователей. Все эти проблемы решаются при переходе на интегральную технологию, которая в настоящее время имеет весьма высокий уровень развития и применяется для выпуска большинства изделий микроэлектроники.

Рассмотренные параметры тонкопленочных магнитомодуляционных и индуктивных преобразователей не позволяют эффективно использовать эти преобразователи в магнитной дефектоскопии (из-за ограниченного диапазона значений напряженности измеряемых полей либо из-за конструктивных особенностей). Наиболее близки к оптимуму трубчатые феррозонды с поперечным возбуждением (ФПВ),

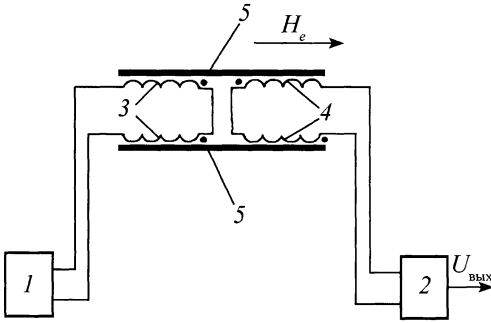


Рис. 3.16. Феррозондовый четногармонический преобразователь-полимер:

- 1 – генератор возбуждения; 2 – полосовой фильтр; 3 – обмотки возбуждения; 4 – измерительные обмотки; 5 – ферромагнитные сердечники

однако их изготовление не исключает ручного труда. В этом плане более предпочтительны тонкопленочные феррозонды с поперечным импульсным возбуждением.

В основу работы феррозондовых преобразователей положено использование нелинейных свойств сердечников из ферромагнитного материала. Классический феррозонд-полимер состоит из двух ферромагнитных проволочных сердечников, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, и четырех обмоток, включенных попарно последовательно, как показано на рис. 3.16. В первую пару обмоток (обмоток возбуждения), включенных встречно, подается синусоидальное напряжение возбуждения частотой f_b , которое постоянно перемагничивает сердечник по предельной петле гистерезиса. Со второй пары обмоток (измерительные обмотки), которые включены согласно, снимается выходное напряжение, поступающее дальше на полосовой фильтр с центральной частотой $2f_b$. Когда напряженность внешнего поля равна нулю, перемагничивание осуществляется симметрично относительно нулевого значения поля. Напряжение измерительной обмотки состоит в этом случае только из нескомпенсированных нечетных гармоник вследствие неполной идентичности сердечни-

ков и обмоток. При внесении сердечников во внешнее поле симметрия перемагничивания нарушается из-за нелинейности характеристики, и в измерительных обмотках появляется ЭДС четных гармоник. Для измерения используется, в основном, вторая гармоника, на которую и настроен узкополосный фильтр. Значение ЭДС четных гармоник при условии, что напряженность измеряемого поля много меньше амплитуды возбуждающего поля, можно определить по формуле

$$e(t) = 4\omega w S \mu_n \sum_{n=1}^n [n \mu_{2n} \sin(2n\omega t)], \quad (3.13)$$

где ω – частота тока возбуждения; w – число витков измерительной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника; n – номер четной гармоники (для второй гармоники $n = 1$); μ_{2n} – магнитная проницаемость на $2n$ -й четной гармонике.

Феррозонд измеряет только компоненту вектора внешнего поля, направленную вдоль образующей сердечников, и обладает чувствительностью к знаку поля. Чувствительность феррозондов может достигать очень больших значений – до $1000 \text{ мВ} \cdot \text{см/А}$. Порог чувствительности – 10^{-9} Тл ($\sim 10,5 \text{ А/см}$), причем это значение достигается при высоком отношении сигнал/шум. Наибольшее значение напряженности измеряемого поля четногармонических феррозондов – около 200 А/см . Максимальное значение ограничено только амплитудой напряженности поля возбуждения. Увеличение напряженности поля возбуждения с целью расширить диапазон измерения в четногармоническом феррозонде приводит к термическому разрушению обмотки. Во избежание этого применяют феррозондовые преобразователи с импульсным возбуждением.

3.3.11. Однообмоточные феррозонды

Индуктивное сопротивление катушки с сердечником из мягкого магнитного материала уменьшается в постоянном маг-

нитном поле. Этот известный эффект используется для измерения напряженности магнитных полей. Преобразователи, построенные на указанном эффекте, в разных источниках названы по-разному: импедансного типа, с нелинейной индуктивностью, дроссельного типа и т.д. Катушку с ферромагнитным сердечником в виде тороида, отрезка проволоки или узкой пластины будем называть индуктивным магниточувствительным элементом, а преобразователи, содержащие такие элементы, – однообмоточными феррозондами.

Рассмотрим процессы, протекающие в таком индуктивном элементе. Пусть сердечник индуктивного элемента имеет предельную гистерезисную петлю, показанную на рис. 3.17.

Суммарное магнитное поле в сердечнике индуктивного элемента можно представить как суперпозицию вспомогательного переменного поля возбуждения напряженностью $H_a(t)$, создаваемого переменным током, который протекает по обмотке элемента, и измеряемого внешнего поля напряженностью H_e :

$$H(t) = H_a(t) + H_e. \quad (3.14)$$

Для упрощения будем считать, что поля H_a и H_e параллельны. Пусть амплитуда переменного поля равна H_m и $H_m > H_s$. Если напряженность измеряемого поля $H_e = 0$, то сердечник перемагничивается переменным полем на участке в его характеристике и полное изменение индукции за период равно $2B_s$. При наличии измеряемого поля с $H_e > 0$ точки a и b (см. рис. 3.17, а) сместятся вправо, что приведет к уменьшению полного изменения индукции. Существенное уменьшение индукции ΔB будет наблюдаться при H_d , превышающих пороговое значение

$$H_{\text{пор1}} = H_m - H_s \quad (H_m > H_s),$$

когда точка a переходит на крутую часть предельной гистерезисной петли (см. кривую 1 на рис. 3.17, б).

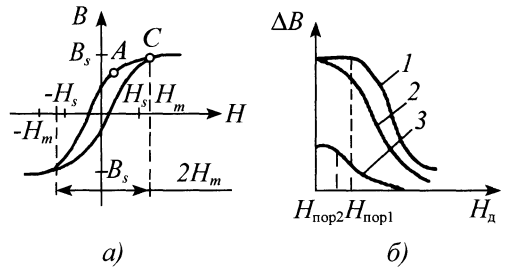


Рис. 3.17. Предельная петля гистерезиса (а) и зависимости полного приращения индукции ΔB от соотношений H_m и H_s (б)

При $H_e > H_{\text{пор1}}$

$$\Delta B = (\mu_{d \max} - \mu_{d \min}) \Delta H_e,$$

где $\mu_{d \max}$, $\mu_{d \min}$ – дифференциальная магнитная проницаемость соответственно на крутой и пологой части предельной гистерезисной петли.

При $H_m < H_s$

$$H_{\text{пор2}} = H_s - H_m. \quad (3.15)$$

Зависимость изменения магнитной индукции от H_e имеет вид кривой 2 на рис. 3.17, б. Если $H_m = H_s$, то $H_{\text{пор1}} \approx \approx H_{\text{пор2}} \approx 0$ и зона нечувствительности на графической зависимости $\Delta B (H_d)$ отсутствует (кривая 3). Очень малые значения H_m , приближающиеся к значению коэрцитивной силы материала сердечника, использовать практически невозможно из-за возникающей при этом нестабильности гистерезисного происхождения.

В индуктивном магниточувствительном элементе полное изменение индуктивности зависит от изменения напряженности внешнего измеряемого магнитного поля и пропорционально максимальной дифференциальной проницаемости ($\mu_{d \max} > \mu_{d \min}$). Это обстоятельство позволяет создавать индуктивные преобразователи различных типов.

Рассмотрим индуктивный элемент и эквивалентную схему замещения однообмоточного феррозонда (рис. 3.18).

Индуктивность индуктивного элемента пропорциональна магнитной про-

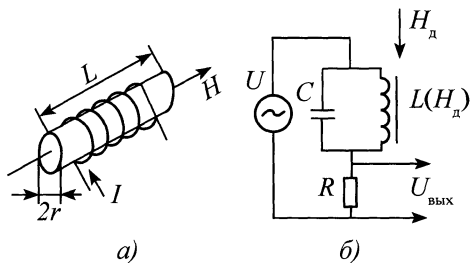


Рис. 3.18. Конструкция индуктивного элемента (а) и эквивалентная схема замещения однообмоточного феррозонда (б)

ницаемости его сердечника. Если бы обмотка индуктивного элемента была выполнена из одного слоя тонкой проволоки, прилегающей вплотную к поверхности сердечника, то кратность изменения индуктивности элемента была бы равна кратности изменения проницаемости тела сердечника при переходе от $H_e = 0$ к $H_e = \infty$. Однако для реальных индуктивных элементов в многоэлементных преобразователях диаметр обмотки много больше диаметра сердечника и всего лишь в несколько раз меньше длины сердечника.

На рис. 3.19 приведена зависимость индуктивности двух индуктивных элементов от напряженности магнитного поля. Как следует из приведенных графиков, зависимость $L(H_d)$ повторяет зависимость $\mu_{d_c}(H_d)$.

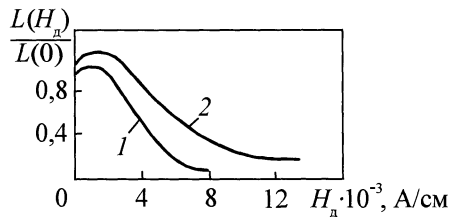


Рис. 3.19. Зависимость относительного изменения индуктивности преобразователя от напряженности магнитного поля: 1 – $w = 30$, $L(0) = 4,4$ мкГн; 2 – $w = 200$, $L(0) = 47$ мкГн

С ростом H_d будут происходить соответствующие уменьшение индуктивного сопротивления обмотки феррозонда $U_L = \omega L(H_d)$ и возрастание напряжения на сопротивлении нагрузки R_n :

$$U_n = \frac{U_m R_n}{\sqrt{R_n^2 + [\omega L(H_d)]^2}}$$

Полученное выражение справедливо для значения R_n , при котором выполняется равенство $U_L = U_C \sim U_m \cos \omega t$.

При этом условии режим работы однообмоточного феррозонда практически не зависит от наличия емкости C . Последняя используется лишь для того, чтобы сильно уменьшить силу тока в нагрузочном сопротивлении при $H_d = 0$, для чего контур L, C настраивается в резонанс с частотой генератора.

МАГНИТНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

Магнитные толщиномеры предназначены для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитном основании. В отличие от вихретоковых они позволяют, как правило, одним прибором измерять в равной степени толщину и диэлектрических, и электропроводящих покрытий. По принципу действия все магнитные толщиномеры можно разделить на три группы: 1) толщиномеры пондеромоторного действия; 2) индукционные; 3) магнитостатические.

Пондеромоторный метод основан на регистрации силы отрыва постоянного магнита или сердечника электромагнита от поверхности изделия и на оценке толщины контролируемого покрытия по значению этой силы. В первом случае сила определяется при помощи пружинных динамометров, во втором – по изменению тока намагничивания.

Указанный метод положен в основу ряда известных переносных и стационарных толщинометров, разработанных в нашей стране и за рубежом. Часть этих приборов, особенно стационарного типа, уже потеряла практический интерес, так как в последние годы были разработаны более совершенные устройства.

Из первой группы приборов, сохранивших свое значение и в настоящее время, следует отметить миниатюрные толщиномеры, которые работают по методу прямого отрыва и конструктивно оформлены в виде карандаша. Приборы карандашного типа состоят из небольшого калиброванного магнита с наконечником в форме полусферы. Наконечник соединен с пружиной, расположенной внутри корпуса. С ее помощью измеряется сила, необходимая для отрыва магнита от поверхности контролируемого изделия. Техника измерений заключается в следующем.

Магнит приводят в соприкосновение с покрытием и вращением подвижной части корпуса прибора растягивают пружину до тех пор, пока упругая сила не станет равна силе притяжения магнита изделием. Для определения толщины покрытия показания, соответствующие длине растяжения пружины, переводят в микрометры с помощью номограмм, прилагаемых к каждому прибору. Приборы карандашного типа обеспечивают возможность контроля покрытий с толщиной до 1000 мкм. К существенным недостаткам этих приборов следует отнести субъективную оценку момента отрыва магнита и влияние ориентации толщиномера при контроле. Отклонение его от вертикального положения вносит дополнительную ошибку, так как в этом случае направления веса магнита и силы отрыва не совпадают.

Среди других типов толщинометров с постоянным магнитом практический интерес представляют малогабаритные толщиномеры *рычажного типа*, конструкция которых обеспечивает компенсацию веса магнита в любом положении (рис. 4.1). Постоянный магнит с полусферическим наконечником 1 закреплен на одном из плеч коромысла 2, на другом плече которого установлен противовес 7. Устройство смонтировано в корпусе 9, имеющем вид молотка. Прибор снабжен кнопкой 8, которая выступает из корпуса, если магнит 1 отрывается от поверхности контролируемого изделия 10. Спиральная пружина 3 соединяет ось вращения системы 4 через палец 5 со шкалой 6. Палец, упруго связанный со шкалой, можно поворачивать снаружи с помощью корректора, что позволяет регулировать натяжение спиральной пружины и таким образом устанавливать нуль на шкале прибора. При вращении шкалы пружина натягивается и отры-

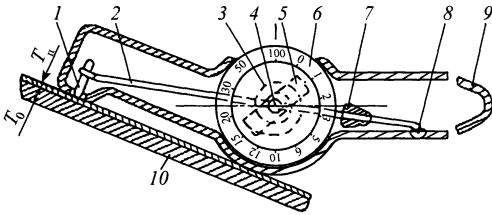


Рис. 4.1. Схема контроля толщины покрытий магнитным толщиномером рычажного типа

вает магнит от поверхности изделия. Толщина покрытия T_n отсчитывается по видимой части шкалы, проградуированной в микрометрах. Нажатием на кнопку можно вновь осуществить контакт наконечника магнита с изделием и тем самым повторить измерение. Приборы рычажного типа позволяют осуществлять контроль различных немагнитных покрытий, нанесенных на ферромагнитную основу, с толщиной до 10 мм. По сравнению с толщиномерами карандашного типа они обеспечивают более высокую точность измерений, особенно при контроле покрытий на изделиях с плоской поверхностью. Применение этих приборов для измерения толщины покрытий на изделиях сложной формы затруднено.

К общим недостаткам всех магнитно-отрывных толщиномеров с постоянным магнитом следует прежде всего отнести изнашивание наконечника магнита, которое влияет на градуирование прибора, и загрязнение магнита различными веществами или ферромагнитными опилками. Кроме того, серьезным недостатком является эффект механического прилипания магнита к поверхности, а при контроле мягких покрытий, например лакокрасочных, — проникновение магнита в покрытие. Необходимо также отметить, что используемые в приборах пружины в процессе эксплуатации изменяют упругие характеристики. Перечисленные факторы могут привести к дополнительным погрешностям измерений, значительно превосходящим значение основной погрешности,

предусмотренной техническими условиями на прибор. Это требует тщательной подготовки таких толщиномеров к работе и, при необходимости, своевременного ввода соответствующих поправок.

Рассматриваемые приборы предназначены для измерения толщины немагнитных покрытий в диапазоне 0 ... 120 мкм и никелевых — 0 ... 100 мкм на деталях различной формы и размеров, в том числе и на деталях сложной конфигурации. Применение в толщиномере МТ-ДА3 преобразователя с игольчатым сердечником уменьшает влияние свойств материала деталей на результаты измерений, а конусная намотка катушки электромагнита позволяет в значительной степени "спрямить" шкалу прибора в диапазоне 0 ... 30 мкм и повысить точность измерений.

подавляющая часть других, разработанных ранее толщиномеров с электромагнитами предназначена главным образом для лабораторных измерений толщин в диапазоне 0 ... 200 мкм. По сравнению с приборами, снабженными постоянными магнитами, они обеспечивают несколько большую точность измерений и возможность контроля покрытий на деталях с меньшими размерами и большей кривизной поверхности. Однако они уступают приборам первой группы по диапазону измеряемых толщин, простоте конструкции и удобству эксплуатации.

Широкое распространение получили *индукционные толщиномеры*, у которых практически все недостатки толщиномеров пондеромоторного действия отсутствуют. Принцип их действия основан на измерении изменений магнитного сопротивления цепи, состоящей из ферромагнитной основы изделия, измерительного преобразователя и немагнитного зазора между ними, соответствующего толщине покрытия.

Индукционный измерительный преобразователь запитывается синусоидальным током. Частота тока, как правило, не превышает 200 Гц. Обобщенная структур-

ная схема толщиномера показана на рис. 4.2.

Автогенератор 1 питает синусоидальным током измерительный преобразователь 2, сигнал которого поступает на вход усилителя 4. Для компенсации начального напряжения измерительного преобразователя 2 используется компенсатор 3, запитываемый, как и преобразователь, от автогенератора. Выходное напряжение компенсатора 3 суммируется с напряжением измерительного преобразователя 2 на входе усилителя 4. Выходное напряжение усилителя с помощью детектора 5 преобразуется в постоянное напряжение, которое поступает в блок обработки сигнала 6, где преобразуется в сигнал, пропорциональный толщине покрытия. Этот сигнал передается в блок индикации 7.

Измерительный преобразователь выполняют в виде одной или нескольких катушек, намотанных на удлиненном сердечнике из ферромагнитного материала. Для уменьшения влияния перекосов преобразователя наконечник сердечника выполняют в форме полусферы.

Для увеличения точности измерений в приборах типа МТ электромагнитное поле локализовано с помощью удлиненного ферромагнитного стержня и шарикового наконечника. Это позволяет измерять толщину в пятне контроля площадью около 1 мм^2 . Краевой эффект проявляется на расстоянии от края детали 3 ... 4 мм. Отклонение оси преобразователя от положения нормали к контролируемой поверхности в пределах 10° не приводит к увеличению погрешности измерений.

В приборах используют накладные преобразователи двух типов:

1) для измерения покрытий на деталях небольших размеров с криволинейной поверхностью и сложной конфигурации; конструктивно оформлен в виде шариковой авторучки;

2) для измерения покрытий на плоских поверхностях; выполнен в призматическом

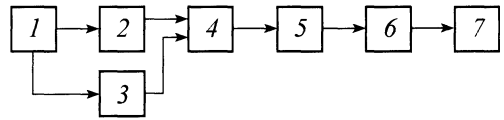


Рис. 4.2. Структурная схема индукционного толщиномера

ческом корпусе и имеет подпружиненный контакт и трехточечную опору.

Из отечественных толщиномеров индукционного типа наибольшее распространение получили такие, как МТ-51НП (производитель – ЗАО "НИИИИ МНПО "Спектр", Москва), Константа-МК2 (производитель – фирма "Константа", С.-Петербург).

Среди зарубежных производителей индукционных толщиномеров в первую очередь можно отметить фирмы Германии: Helmut Fischer (прибор Deltascope), Karl Deutsch (приборы серии Leptoscop 2030, 2041, 2051), Elektrophisik (прибор Micro1e51 PB1250). Также хорошо известны толщиномеры британской фирмы Elcometer (Elcometer 345, Elcometer 355).

По сравнению с толщиномерами пондеромоторного действия индукционные толщиномеры обладают значительно более высокой точностью измерений (обычно 3 % измеряемого значения), процесс измерения в них идет практически непрерывно, что значительно его упрощает и ускоряет.

К третьей группе магнитных толщиномеров относятся *магнитостатические толщиномеры*. Принцип их действия основан на определении напряженности магнитного поля в зазоре между постоянным магнитом (или электромагнитом) и ферромагнитным материалом основы.

Схема действия магнитостатических толщиномеров с преобразователем Холла приведена на рис. 4.3.

В большинстве современных магнитных толщиномеров используется двухполюсная магнитная система с постоянными стержневыми и П-образными магнитами.

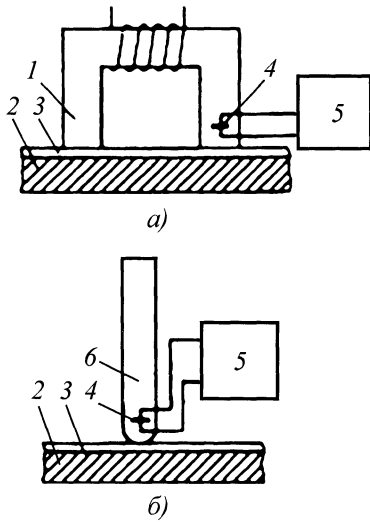


Рис. 4.3. Схемы действия

магнитостатических толщиномеров:

а - с П-образным электромагнитом;

б - со стержневым постоянным магнитом;

1 - электромагнит; 2 - ферромагнитная деталь;

3 - немагнитное покрытие; 4 - преобразователь

Холла; 5 - измерительный прибор;

6 - постоянный магнит

Простейшими приборами такого типа являются толщиномеры, в которых сочетается применение П-образного магнита и механической магнитоуравновешенной системы, расположенной в межполюсном пространстве магнита.

Прибор состоит из П-образного постоянного магнита, имеющего перешеек (параллельную магнитную цепь). В зазоре перешейка смонтирована подвижная магнитная стрелка, жестко связанная с уравновешивающей пружиной. При установке прибора на изделие магнитное сопротивление в межполюсном зазоре уменьшается, что вызывает перераспределение магнитного потока в основной и параллельной магнитных цепях. С изменением магнитного потока стрелка прибора поворачивается на угол, пропорциональный толщине измеряемого покрытия. Приборы этого типа получили достаточно широкое распространение. Однако их используют только для ориентировочной экспресс-оценки толщины покрытия, так как при

применении упругой механической системы в сочетании с небольшой по размерам шкалой невозможно получить необходимую точность отсчета в широком диапазоне. Кроме того, при большом расстоянии между полюсами магнита нельзя использовать прибор для контроля малогабаритных деталей.

При всех преимуществах двухполюсных систем, используемых в магнитной толщинометрии покрытий, они имеют недостатки. Системы чувствительны к анизотропии свойств и к шероховатости ферромагнитного основания; кроме того, при их использовании необходимо обеспечивать одинаковый и надежный контакт полюсов преобразователя с контролируемой поверхностью.

Применяют также однополюсные преобразователи со стержневыми магнитами. Для уменьшения потока рассеяния контактирующий с изделием полюс магнита выполняют в виде полусферы из магнитомягкого материала.

Распространенным способом получения информации о толщине покрытия является размещение магниточувствительных элементов либо в магнитной нейтрали, либо непосредственно у полюсов магнита с использованием дифференциального включения магниточувствительных элементов, что обеспечивает работу преобразователя в режиме нулевого начального сигнала.

При работе с магнитными толщиномерами необходимо учитывать многочисленные факторы, влияющие на результаты измерений: колебания магнитных свойств покрытия или основы, состояние поверхности, форму изделия и др. В значительной мере влияние этих факторов обусловлено размерами и формой магнита, топографией и напряженностью магнитного поля. В связи с возросшими требованиями к точности и надежности производственного контроля толщины покрытий резко возросли требования к их метрологическому обеспечению.

Для измерения толщины покрытий изоляции трубопроводов до 100 мм применяют приборы типа МТП-01 с однополюсными преобразователями на постоянных магнитах с использованием преобразователей Холла (рис. 4.3, б).

Специальная схема питания преобразователя Холла позволяет практически полностью исключить влияние изменений температуры на погрешность измерений. В результате прибор имеет относительную погрешность измерений не более 3 % во всем диапазоне рабочих температур от -10 до $+45$ °С, что даже превосходит по точности индукционные толщиномеры, так как большинство из них имеют дополнительную погрешность измерений, обусловленную изменением температуры окружающей среды.

Наряду с тем, что магнитостатические толщиномеры имеют более простую схемную реализацию и более технологичный в исполнении измерительный преобразователь (отсутствует необходимость намотки катушек), это делает их развитие более перспективным по сравнению с индукционными толщиномерами.

Другим важным преимуществом магнитостатических толщиномеров является отсутствие переменного магнитного поля, создаваемого измерительным преобразователем и приводящего к потерям на вихревые токи при контроле электропроводящих немагнитных покрытий.

Обобщенная структурная схема магнитостатического толщиномера приведена на рис. 4.4.

Источник 1 тока питает магниточувствительный измерительный преобразователь 2. В качестве измерительного преобразователя 2 могут использоваться магниторезисторы, преобразователи Холла, феррозонды, рамки с током и другие магниточувствительные элементы. Напряжение с измерительного преобразователя 2 через усилитель постоянного тока 3 поступает в блок обработки сигнала 4, где оно преобразуется в сигнал толщины по-

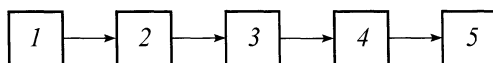


Рис. 4.4. Структурная схема магнитостатического толщиномера

крытия. Этот сигнал передается в блок индикации 5.

В ряде стран организовано централизованное производство стандартизованных контрольных образцов с разными сочетаниями материалов покрытия и основы. Такие образцы используют при градуировании и поверке магнитных толщиномеров в процессе их разработки и эксплуатации. Тем не менее, огромное число вновь разрабатываемых и применяемых материалов исключает возможность серийного выпуска всей гаммы образцов. Поэтому важнейшей задачей, стоящей перед разработчиками приборов магнитной толщинометрии, является создание безобразцового метода измерения толщины покрытий.

По сравнению с магнитными толщиномерами покрытий значительно меньшее распространение получили магнитные толщиномеры для измерения толщины изделий из ферромагнитных материалов. Это объясняется сложностью создания таких приборов с малой погрешностью, особенно при измерении больших толщин. Принцип работы *магнитных индикаторов толщины* типа МИТ-1 с постоянными магнитами основан на считывании изменения магнитных полей рассеяния, вызванного утонением металла. С помощью прибора обнаруживаются коррозионные язвы и места утонения металла, обусловленные коррозионным и эрозийным поражением. Основу составляют П-образный магнит и расположенный между полюсами преобразователь Холла. Основное назначение – контроль трубопроводов, емкостей из ферромагнитных сталей толщиной до 12 мм.

Для измерения толщины стенки ферромагнитных труб в поточном производстве создан *магнитный микрометр*. Измерения производят методом магнитного моста, два плеча которого составляют стандартная и контролируемая трубы, два других – сердечник электромагнита. В

перемычке моста в качестве измерительного элемента применен феррозонд. Прибор предназначен для измерения труб диаметром 30 ... 102 мм с толщиной стенок 1,5 ... 8 мм. Погрешность измерений составляет 3 ... 4 % при скорости контроля до 2,5 м/с.

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При феррозондовом методе дефектоскопии в качестве преобразователя магнитного поля используются активные индукционные преобразователи, в которых рабочим элементом являются ферромагнитные сердечники – *феррозонды* (за рубежом их называют также Ферстерзонды).

Феррозонды могут быть одноэлементными (ферроэлемент), двухэлементными и многоэлементными. Двухэлементные зонды здесь выделены в особую группу, так как они наиболее широко применяются именно для магнитной дефектоскопии. Простейший феррозонд (ферроэлемент) состоит из магнитомягкого сердечника в виде полосы или проволоки с нанесенными на него возбуждающей и индикаторной обмотками. Если по обмотке возбуждения пропустить ток частотой f , то сердечник будет с такой же частотой перемагничиваться; при этом в индикаторной обмотке возникнет ЭДС

$$e = -wS \frac{dB}{dt}, \quad (5.1)$$

где w – число витков индикаторной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника; B – значение индукции сердечника в данный момент времени.

При воздействии на сердечник постоянного поля напряженностью H_0 в индикаторной обмотке кроме ЭДС основной частоты e_f наводится также e_{2f} – ЭДС удвоенной частоты, причем при определенных условиях $e_{2f} = kH_0$, где k – коэффициент пропорциональности.

5.2. ДВУХЭЛЕМЕНТНЫЙ ФЕРРОЗОНД

Принцип работы феррозондов рассмотрим на примере двухэлементной мо-

дификации, тем более что именно двухэлементные зонды получили наибольшее распространение и могут использоваться как измерители поля (полимеры) и как разностные полимеры, измеряющие разность полей в двух областях (участках) пространства, где расположены ферроэлементы. Если в этом случае ферроэлементы расположены близко друг к другу, то считается, что они измеряют градиент поля, и такие зонды называют *градиентометрами*.

Пусть имеются два совершенно идентичных ферроэлемента, включенных по схеме на рис. 5.1. В каждый заданный момент времени поле возбуждения H_B в ферроэлементах направлено встречно, и в индикаторных обмотках, поскольку они включены последовательно, будет наводиться ЭДС $e = e_1 + (-e_2) = 0$. Чтобы оценить влияние измеряемого поля H_0 , рассмотрим рис. 5.2.

На рис. 5.2, *a* построены кривые намагничивания 1, 2 соответственно для первого и второго сердечников в зависимости от H_B . Если в определенный момент времени первый сердечник имеет некоторую индукцию $+B_1$, то второй сердечник (поскольку H_B в сердечниках находятся в противофазе) – индукцию $-B_1$. При этом суммарная ЭДС

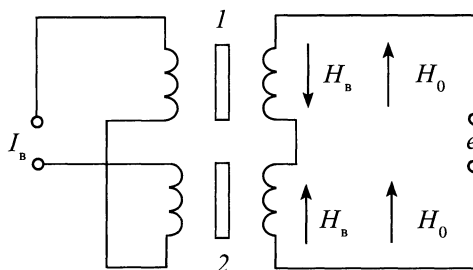


Рис. 5.1. Схема включения феррозонда-полимера

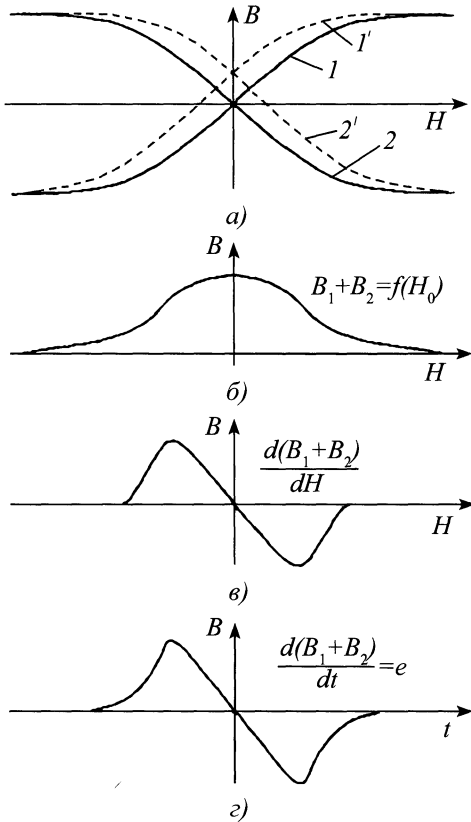


Рис. 5.2. Зависимости, поясняющие принцип действия феррозонда-полимера

$$e = -wSd[B_1 + (-B_1)]/dt = 0. \quad (5.2)$$

Под действием поля H_0 при $H_B = 0$ в первом сердечнике индукция будет равна некоторому значению B_A , кривая 1 сместится в положение 1'. Но во втором сердечнике при этих условиях индукция также будет равна B_A , и кривая 2 сместится в положение 2'. Теперь уже сумма $B_1 + B_2 \neq 0$, а B будет зависеть от H_B , как показано на рис. 5.2, б.

График функции $d(B_1 + B_2)/dH_B$ показан на рис. 5.2, в, а график функции

$$e \cong \frac{d(B_1 + B_2)}{dt} = \frac{d(B_1 + B_2)}{dH} \frac{dH}{dt} \quad (5.3)$$

приведен на рис. 5.2, г. Видно, что суммарная ЭДС проходит полный период (см.

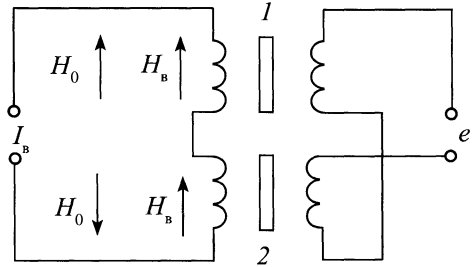


Рис. 5.3. Схема включения феррозонда-градиентометра

рис. 5.2, г) за то время, пока сумма $B_1 + B_2$ проходит половину периода, т.е. частота e в 2 раза выше, чем у поля возбуждения. В формуле (5.2.) $dH/dt = \text{const}$, поскольку $H_0 \ll \dot{H}_B$.

Рассмотрим те же элементы, но включенные по схеме на рис. 5.3. В этом случае поле возбуждения в обоих сердечниках одинаково по амплитуде и фазе, но индикаторные обмотки включены встречно, так что опять при отсутствии внешних полей $e = 0$.

Обратимся к рис. 5.4, а. В обоих сердечниках поле одинаково, и кривые намагничивания 1, 2 у обоих сердечников тоже одинаковы. Если бы на оба сердечника действовало одно и то же поле H_0 , то

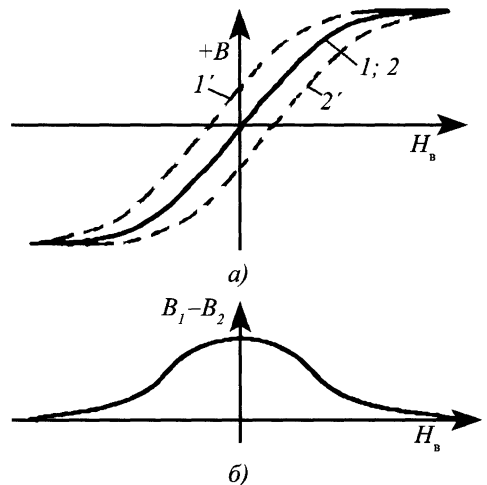


Рис. 5.4. Зависимости, поясняющие принцип действия феррозонда-градиентометра

кривые сместились бы в одну сторону, например в положение I' , так что на выходе было бы $e = 0$. Это чрезвычайно важное свойство градиентометров – не реагировать на однородное поле.

Далее идут рассуждения такие же, как и в случае полимера, но вместо $B_1 + B_2$ необходимо брать $B_1 - B_2$ (рис. 5.4, б).

Отметим, что схема на рис. 5.3 получена из схемы, изображенной на рис. 5.1, простым поворотом одного из ферроэлементов на 180° в плоскости, перпендикулярной к плоскости чертежа. Таким образом, если позволяет длина соединительных проводов между ферроэлементами, один и тот же прибор может служить и как суммарный полемер, и как разностный полимер (градиентометр).

Если элементы разнести в пространстве, то можно использовать одноплечевую схему измерений, когда на один ферроэлемент воздействуют заданным опорным полем, а измерения проводят вторым ферроэлементом, так что значение e будет соответствовать увеличению или уменьшению напряженности измеряемого поля относительно опорного.

5.3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Существует большое количество расчетов феррозондовых преобразователей. Это связано с тем, что кривая намагничивания (или тем более петля гистерезиса) не имеет точного математического описания, поэтому приходится допускать те или иные приближения. Приведем наиболее простой из расчетов.

Аппроксимируем кривую перемагничивания сердечника ферроэлемента степенным рядом, в котором ограничимся двумя первыми членами:

$$B = aH - bH^3. \quad (5.4)$$

Подставим в уравнение (5.4) выражение для поля

$$H = H_0 + \hat{H}_b \sin(\omega t). \quad (5.5)$$

После несложных тригонометрических преобразований, имея в виду, что

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\alpha) \text{ и}$$

$$\sin^3 \alpha = \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{4} \sin(3\alpha),$$

получим

$$\begin{aligned} B = & a[H_0 + \hat{H}_b \sin(\omega t)] - b[H_0 + \\ & + \hat{H}_b \sin(\omega t)]^3 = aH_0 - bH_0^3 - \\ & - \frac{3}{2} b\hat{H}_b^2 H_0 + \left(a\hat{H}_b - 3b\hat{H}_b H_0^2 - \frac{3}{4} b\hat{H}_b^3 \right) \times \\ & \times \sin(\omega t) + \frac{3}{2} b\hat{H}_b^2 H_0 \cos(2\omega t) + \\ & + \frac{1}{4} b\hat{H}_b^3 \sin(3\omega t). \end{aligned} \quad (5.6)$$

В соответствии с выражением (5.6)

$$\begin{aligned} e = & -wS \left[\left(a\hat{H}_b - 3b\hat{H}_b H_0^2 - \frac{3}{4} b\hat{H}_b^3 \right) \cos(\omega t) - \right. \\ & \left. - 3b\hat{H}_b^2 H_0 \sin(2\omega t) + \frac{3}{4} b\hat{H}_b^3 \cos(3\omega t) \right]. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Из формулы (5.7) следует, что при H_0 выходная ЭДС ферроэлемента содержит только члены с $\cos(\omega t)$ и $\cos(3\omega t)$, т.е. первую и третью гармоники, причем третья гармоника появляется вследствие нелинейности сердечника: при $b = 0$ член с $\cos(3\omega t)$ исчезает.

При $H_0 \neq 0$ появляется член с $\sin(2\omega t)$ – вторая гармоника, амплитуда которой пропорциональна H_0 . Эта гармоника может быть выделена соответствующим фильтром и использована для измерения H_0 .

Формула (5.7) выведена для одного ферроэлемента. Для другого ферроэлемента в выражении (5.5) перед $\hat{H}_b \sin(\omega t)$ нужно поставить знак минус, и легко убедиться, что при суммировании в окончательной формуле члены с $\cos(\omega t)$ и $\cos(3\omega t)$ взаимно вычтутся и останется только вторая гармоника – в этом еще одно преимущество двухэлементных зондов.

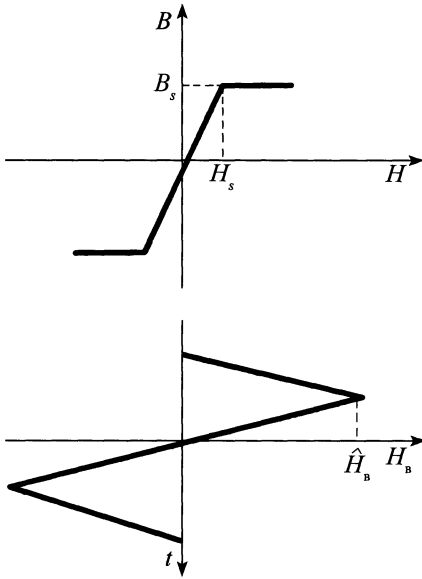


Рис. 5.5. Графики к расчету выходной ЭДС ферроэлемента

Отметим, что формула (5.7) не пригодна для конкретных расчетов (не известен коэффициент b , не учитывается размагничивающий фактор и т.д.).

Рассмотрим еще одну аппроксимацию кривой намагничивания, показанную на рис. 5.5. Для нее получена следующая формула:

$$A_n = \frac{4}{\pi} \omega w S H_0 \frac{B_s}{H_s} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \frac{H_s}{\hat{H}_b}, \quad (5.8)$$

где A_n – амплитуда гармоники ($n = 2, 4, 6, \dots$). Остальные обозначения указаны на рис. 5.5.

Проанализируем выражение (5.8). Прежде всего, величина B_s/H_s есть не что иное, как проницаемость сердечника μ_T . Если сердечник изготовлен из магнитомягкого материала, то $\mu_T = \mu_\phi$, где μ_ϕ – проницаемость формы, зависящая от геометрических размеров. При одинаковых диаметрах d чувствительность зонда больше у длинных сердечников (чувствительность $\gamma = A_n/H_0$).

Если $\hat{H}_b = H_s$, т.е. нелинейность отсутствует, то $A_n = 0$.

Для случая высокопроницаемых сердечников, когда $H_s/\hat{H}_b \rightarrow 0$ из формулы (5.8) получаем

$$A_n = 2n\omega W S H_0 H_s / \hat{H}_b, \quad (5.9)$$

однако при очень больших \hat{H}_b $A_n \rightarrow 0$.

Таким образом, зависимость A_n от \hat{H}_b достаточно сложная: при малых \hat{H}_b ($\hat{H}_b < H_s$) $A_n = 0$ и при $\hat{H}_b \rightarrow \infty$ также $A_n = 0$. Существуют оптимальные значения \hat{H}_b , которые можно определить по формуле (5.8), когда значение γ максимально.

Зависимость A_n от H_0 также неоднозначна: формула (5.8) справедлива только для малых H_0 . Из рис. 5.5 следует, что при больших H_0 $A_n = 0$.

В табл. 5.1 приведены данные для зонда с разным числом витков обмоток возбуждения w_b и индикаторных обмоток w_n , с различными длиной l и диаметром d_c сердечников. Здесь также указаны значения оптимального тока возбуждения I_b .

5.1. Параметры феррозондовых преобразователей

№ п/п	w_b	w_n	l , мм	d_c , мм	I_b , мА
1	230	300	2,0	0,10	70
2	114	107	1,0	0,10	135
3	70	60	0,5	0,05	125

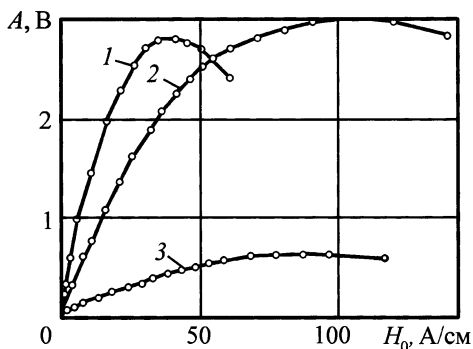


Рис. 5.6. Характеристики преобразования феррозондов

На рис. 5.6 приведены характеристики преобразования ($1-3$) этих зондов, т.е. зависимость $A(H_0)$. Частота поля возбуждения лежит в пределах $100 \dots 150$ кГц. У зондов 2 и 3 проницаемость μ_f примерно одинакова, а чувствительность меньше, чем у зонда 1. Максимумы их градуировочных кривых приходятся на большие, чем для зонда 1, измеряемые поля H_0 .

5.4. МАТРИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Известный матричный преобразователь (разработки ИФМ) представляет собой тонкопленочную матрицу (32 строки и

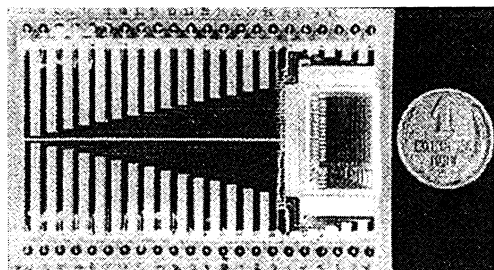


Рис. 5.7. Матричный преобразователь

8 столбцов) из магниточувствительных элементов размером $100 \times 100 \times 0,1$ мкм (рис. 5.7). Планарные выводы кристалла соединены со специализированной микросхемой, включающей устройство возбуждения, дешифраторы строк и столбцов, а также предварительный усилитель.

В технологическом плане матричный преобразователь — достаточно сложная девятислойная тонкопленочная структура, полученная напылением в вакууме. Разработанный физический принцип работы МЭ обеспечивает большие возможности для увеличения разрешающей способности матричного преобразователя. Речь идет о создании матриц с МЭ микрометровых размеров. Их предельные размеры

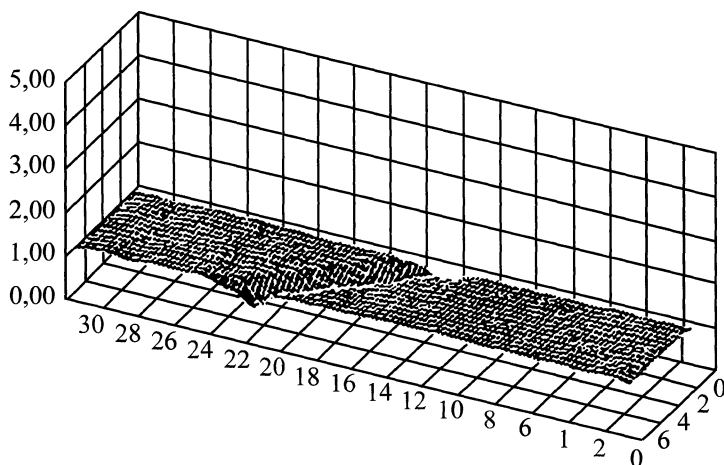


Рис. 5.8. Магнитный рельеф от подповерхностной трещины с раскрытием 30 мкм

ограничены чисто технологическими возможностями, т.е. техническим уровнем завода-изготовителя.

Матричный преобразователь позволяет получить топографию магнитных полей с локализацией начиная со 100 мкм и измерять знакопеременные магнитные поля в диапазоне 0,1 ... 150 А/см.

Высокое быстродействие матричного преобразователя благодаря электронному сканированию позволяет наблюдать магнитные рельефы (рис. 5.8), возникающие при нестационарных магнитных процессах (например, процесс намагничивания при включении постоянного тока), а также в переменных полях. В этом случае может быть получена совершенно новая качественная информация о дефекте. Связь с персональным компьютером позволяет записать эти рельефы и неоднократно просматривать их вновь в замедленном или ускоренном варианте.

Применение матричных преобразователей может значительно повысить информативность и производительность неразрушающего контроля труб и сварочных соединений. Их использование эффективно и в таких областях, как контроль магнитных носителей информации для вычислительной техники, контроль полей магнитных головок систем магнитной записи. Очевидно, что матричные преобразователи должны быть востребованы при создании компьютерных систем магнитной микроскопии, томографии и диагностики.

5.5. ТЕХНИКА ФЕРРОЗОНДОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

5.5.1. Техника применения феррозондов

Для измерения H_0 можно привлечь любую из четных гармоник (либо их сумму), но, как следует из формулы (5.8), для получения одинаковых амплитуд гармоник для одного и того же значения H_0 не-

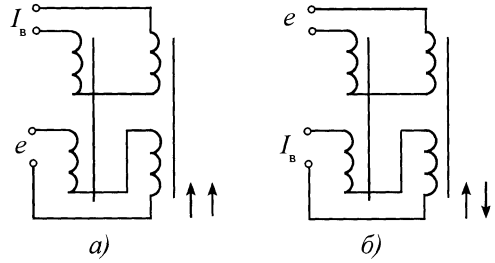


Рис. 5.9. Схемы включения полимера (а), градиентометра (б) и их символы

обходимо иметь $\hat{H}_B = nH_s$, т.е. с увеличением номера гармоники необходимо увеличивать поле возбуждения зонда, что не всегда возможно. Поэтому чаще всего используют вторую гармонику. Кроме того, как показано выше, ЭДС от нечетных гармоник почти полностью исключается, если использовать два ферроэлемента.

При этом в зависимости от расположения ферроэлементов в пространстве можно измерять либо сумму полей, действующих на ферроэлементы, либо их разность (рис. 5.9).

Основная задача дефектоскопии — измерение напряженности поля у поверхности изделия — можно решить путем применения ферроэлементов в разных сочетаниях (рис. 5.10). При этом следует иметь в виду, что измеряется та составляющая поля, которая направлена вдоль сердечника. Прежде всего, может быть измерена тангенциальная (t), либо нормальная (n) составляющие всех полей над изделием. Для этой цели применяются полимеры с одним, двумя или несколькими ферроэлементами. Поскольку поля дефектов являются локальными, то оказывается целесообразным применение градиентометров, ферроэлементы которых несколько разнесены в пространстве: по горизонтали (tx - и nx -градиентометры) или по вертикали (tz - и nz -градиентометры).

Применение градиентометров позволяет, во-первых, в значительной степени избавиться от влияния внешних (в том числе намагничивающих) полей и, во-вто-

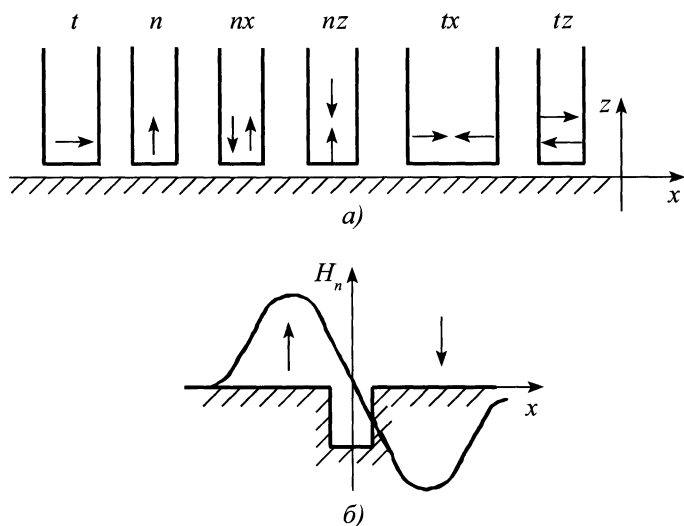


Рис. 5.10. Расположение сердечников преобразователей относительно поверхности изделия (а) и трещин (б)

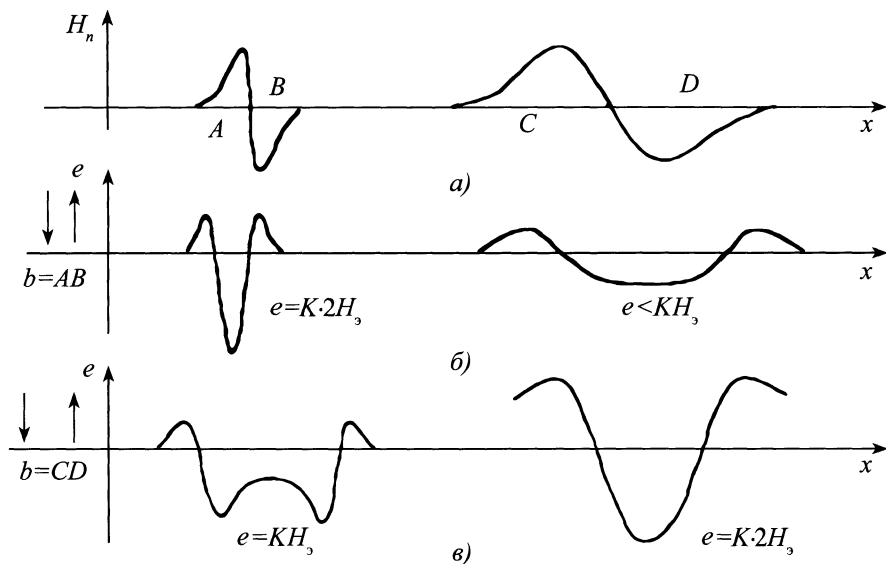


Рис. 5.11. Зависимость сигнала преобразователя типа nx от базы b :
 K – коэффициент; H_3 – экстремальное значение H_n

рых, наиболее эффективно использовать форму поля дефекта. Расстояние между элементами (сердечниками) – так называемая база b – должно соответствовать расстоянию между экстремумами поля дефекта.

Варьирование базы nx -градиентометра является важным инструментом оптимизации процесса контроля. На рис. 5.11 показано изменение нормальных составляющих H_n двух дефектов, один из которых узкий (трещина) и имеет локаль-

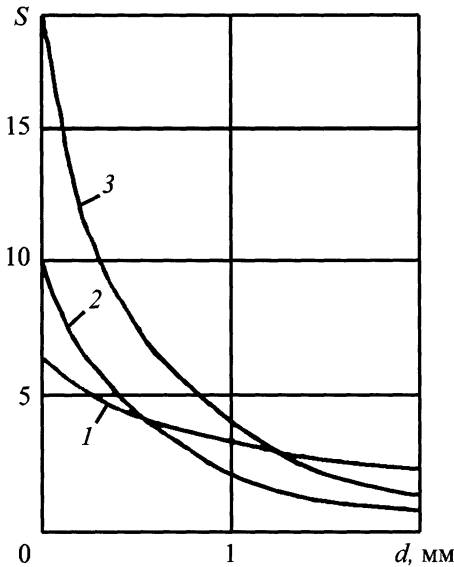


Рис. 5.12. Кривые 1–3 изменения отношения полезного сигнала к сигналам-помехам для преобразователей длиной $l = 2, 1$ и $0,5$ мм в зависимости от зазора d

ное поле, другой – широкий (лунка, раковина, утонение стенки).

Можно выбрать базу $b = AB$, соответствующую расстоянию между экстремумами первого дефекта. В этом случае сигнал от второго дефекта по амплитуде будет во много раз меньше, чем сигнал от первого (рис. 5.11, б). Если выбрать $b = CD$, то сигнал от второго дефекта будет в 2 раза больше, чем сигнал от первого (рис. 5.11, в). Следовательно, при выборе базы преобразователя ix следует ориентироваться на наиболее типичные дефекты конкретного производства. Выбор оптимальной базы преобразователя способствует также повышению селективности контроля $S = A_d/A_n$, где A_d и A_n – сигнал от дефекта и от помех соответственно. Например, на прутках из шарикоподшипниковой стали наиболее типичным дефектом является волосовина (очень узкая продольная трещина), а наиболее типичной помехой – наклеп, получающийся в результате их правки. Его магнитное поле значительно шире, поэтому уменьшение

базы b приводит к увеличению S .

Значение b также зависит от зазора между преобразователем и поверхностью изделия и, как следствие этого, от длины сердечника, поскольку измеряемое поле является средним по длине сердечника. Увеличение длины сердечника равносильно увеличению зазора между поверхностью изделия и преобразователем.

Рис. 5.12 иллюстрирует селективность преобразователей с параметрами, приведенными в табл. 5.1, и оптимальной базой при разных значениях d (расстояние между нижними концами сердечников и поверхностью изделия). Видно, что для получения максимального S необходимо, чтобы $d \rightarrow 0$, $l \rightarrow 0$, b – оптимум. Однако при увеличении d для коротких преобразователей база становится неоптимальной и значение S резко падает. Изменение S для длинных преобразователей не является столь резким, поскольку они интегрируют поле по своей длине и при $d = 0$ оптимальная база преобразователя с $l = 2$ мм соответствует полю примерно на высоте 1 мм от поверхности.

5.5.2. Контроль цилиндрических объектов

Для всех объектов цилиндрической формы, поскольку они являются изделиями проката, характерные дефекты вытянуты вдоль их образующей. В связи с этим наиболее приемлемый метод намагничивания – циркулярный, а наиболее приемлемое расположение преобразователя типа ix – вдоль окружности.

Могут быть рассмотрены две схемы контроля: либо пруток движется поступательно-вращательно, а преобразователь остается неподвижным, либо зонд вращается, а пруток движется поступательно. В обоих случаях контроль осуществляется по спирали, но вторая схема является более предпочтительной, так как можно существенно уменьшить шаг сканирования.

Если контроль проводится в приложенном поле, то следует иметь в виду, что

при параллельном расположении сердечников ix -градиентометра уже в отсутствие поля дефекта на его выходе будет сигнал. Это видно по рис. 5.13, а: H'_n и H''_n направлены в разные стороны, следовательно, $e = K \cdot 2H_n$ (очевидно, что $H'_n = H''_n$). Чтобы избежать этого сигнала, необходимо установить сердечники по радиусу прутка, тогда $H_n = 0$. Но обычно один и тот же дефектоскоп предназначается для контроля прутков разных диаметров, и каждый раз необходимо выстраивать преобразователи по радиусу. Во избежание применения механических устройств можно воспользоваться идеей, которую иллюстрирует рис. 5.13, б: поворотом кубика вокруг вертикальной оси, проходящей через точку O , для любого диаметра можно добиться, чтобы проекция H на l была равна нулю.

На рис. 5.14 представлены результаты контроля прутковой стали феррозондовым и магнитопорошковым методами.

Здесь наглядно видны преимущества феррозондового контроля (коэффициент корреляции между величиной сигнала и глубиной дефекта h составил 0,86) и основной недостаток магнитопорошкового

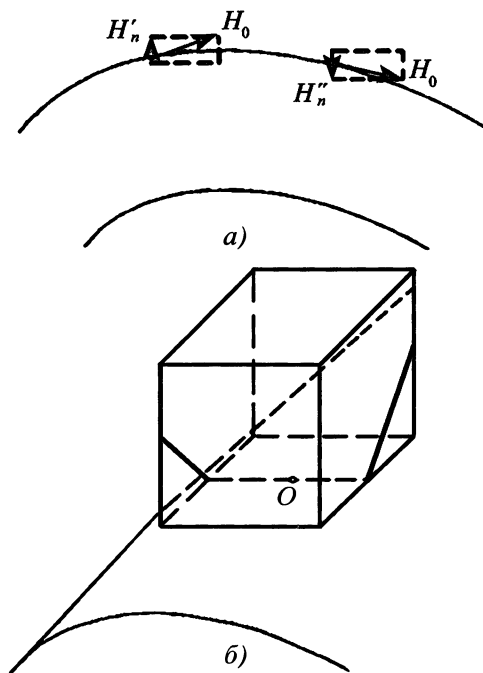


Рис. 5.13. Контроль цилиндрических поверхностей

метода – субъективный фактор. Те дефекты, которые первоначально пропущены контролерами, при повторном осмотре

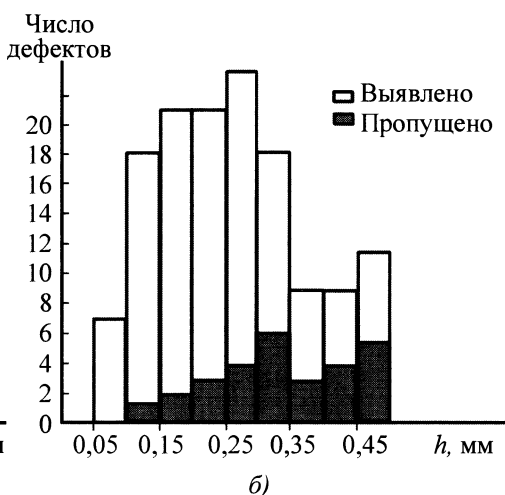
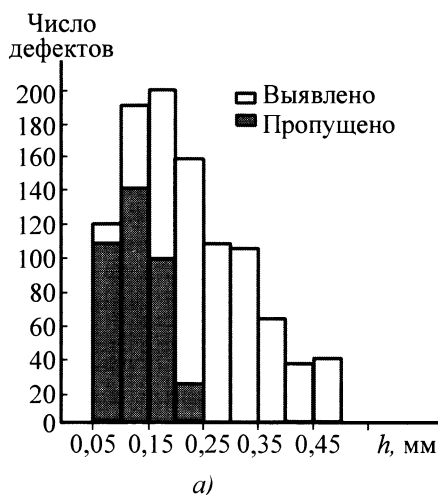


Рис. 5.14. Результаты контроля прутков феррозондовым (а) и магнитопорошковым (б) методами

были полностью выявлены.

Контроль труб незначительно отличается от контроля прутков. Циркулярное намагничивание может осуществляться как пропусканием тока непосредственно по трубе, так и с помощью стержня внутри трубы ("туботест" института Ферстера). Известны также системы с вращающимися электромагнитами, между полюсами которых располагаются lx -градиентометры.

5.5.3. Феррозондовые приборы

Комбинированный микропроцессорный феррозондовый прибор типа Ф-205.03 выполняет функции измерителя и дефектоскопа (дополнительные функции – запоминание результатов измерений и технологической информации, отслеживание текущего времени и т.п.).

На рис. 5.15 показано расположение сердечников ферроэлементов внутри феррозондового преобразователя (ФП) и дана привязка декартовых координат (x, y, z) .

При измерении напряженности статического поля погрешности приборов гарантируются, если поле до внесения в него ФП (невозмущенное поле) однородно внутри объема, в который при измерении

помещаются оба стержня. Внутри этого объема ФП позволяет измерять H_z (рис. 5.15, а) и H_x (рис. 5.15, б), где H_z, H_x – проекции вектора \mathbf{H} напряженности невозмущенного магнитного поля на оси z и x соответственно.

При измерении градиента G напряженности статического поля погрешности гарантируются, если невозмущенное поле однородно вдоль стержней. Для измерения G используются ФП согласно рис. 5.15, а. Значение G вычисляют по формуле

$$G = (\Delta x)^{-1} [H_x(x_2, 0, \alpha_2) - H_x(x_1, 0, \alpha_1)],$$

где Δx – база ФП; $x_{2,1} = \pm \Delta x/2$; $\alpha_{2,1}$ – величины, принимающие любые значения от 0 до l ; l – длина стержней.

При работе в качестве дефектоскопа приборы сравнивают градиент G с порогом. Превышению порога соответствует срабатывание индикатора дефекта. Участок контролируемой поверхности должен сканироваться с помощью ФП вручную.

При дефектоскопии и измерении G используются два ФП-градиентометра с базой 4 и 3 мм. Для измерения поля используются также два ФП-полимера – один для измерения H_x , а другой – H_z .

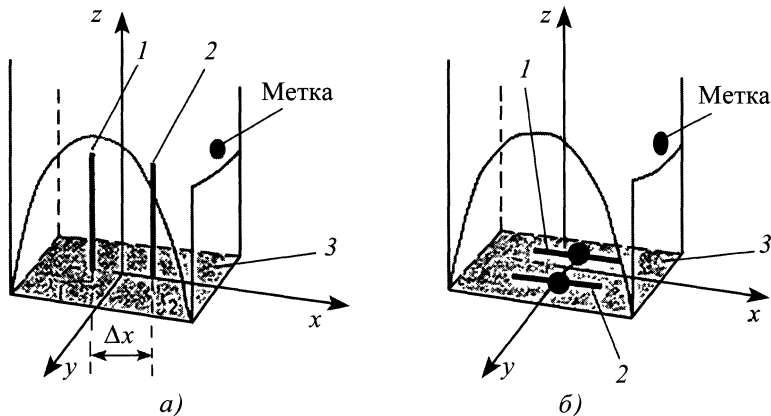


Рис. 5.15. Привязка осей координат к феррозондовому преобразователю:

1, 2 – пермаллоевые стержни; 3 – донышко

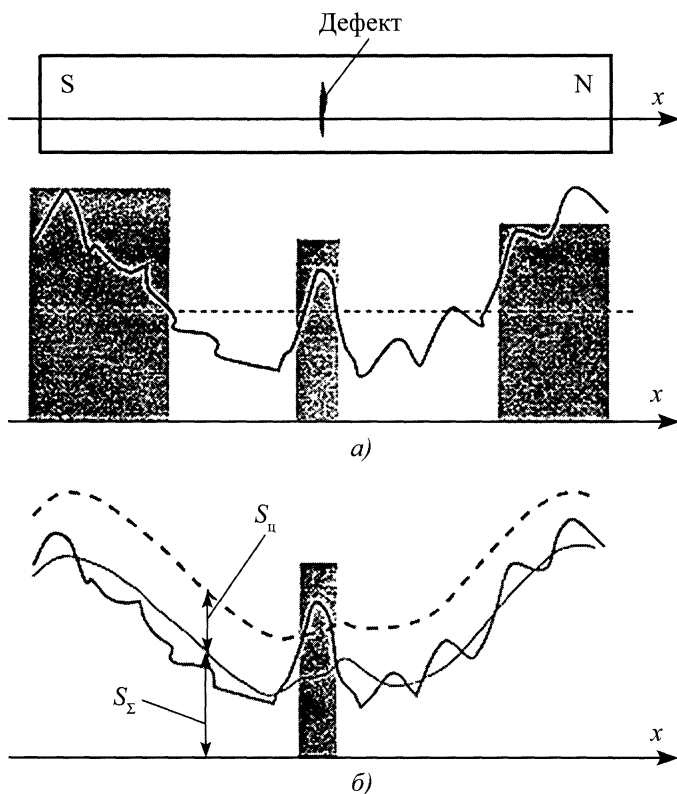


Рис. 5.16. Обнаружение дефекта с постоянным (а) и следящим (б) порогом

При дефектоскопии прибор может работать в режиме как постоянного, так и следящего порога. Если установлен постоянный порог, возрастание градиента при приближении ФП к краю детали приводит к ошибкам.

На рис. 5.16 показана деталь с дефектом посередине. При заданном значении (рис. 5.16, а) постоянного порога (штриховая линия) дефект обнаруживается (средняя затемненная область), но это сопровождается ложными срабатываниями индикаторов дефектов на краях детали (периферийные затемненные области). Следящий порог позволяет контролировать поверхность детали до ее границ

(рис. 5.16, б) без ошибок. Следящий порог S определяют по формуле

$$S = S_{ц} + S_{\Sigma},$$

где $S_{ц}$ – центрированный порог (постоянная величина); S_{Σ} – усредненный градиент, который подчиняется рекуррентному соотношению

$$S_{\Sigma}(n) = S_{\Sigma}(n - 1) + k\Delta G(n),$$

в котором $\Delta G(n) = G(n) - G(n - 1)$; $k = \lambda_i$, если $W_i \leq \Delta G(n) < W_{i+1}$; $i = 0, 1, \dots, m$, $\lambda_i < \lambda_{i+1}$, $W_i > W_{i+1}$. Величины W_i "защиты" в программу дефектоскопа, $m = 5$.

МАГНИТОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс магнитографического контроля состоит из двух операций: записи полей рассеяния над объектом контроля (рис. 6.1, *а*) и считывания магнитного отпечатка с ленты (рис. 6.1, *б*). При записи лента 4 укладывается на объект контроля 1 (прижимается к его поверхности), и намагничивание обычно осуществляется электромагнитом 2. Считывание производится в специальном аппарате (он и называется магнитографическим дефектоскопом), который снабжен вращающимся барабаном с закрепленным в нем преобразователем. Лента протягивается вплотную к барабану – происходит построчное сканирование. В качестве преобразователей 6 используют магнитную головку или феррозонд.

В качестве лент обычно применяются двухслойные, состоящие из немагнитной основы (ацетилцеллюлозы, полихлорвинила, лавсана) и магнитоактивного слоя – магнитного порошка, взвешенного в лаке, который обеспечивает хорошую адгезию с основой. Для изготовления рабочего слоя ис-

пользуют гамма-оксиды железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), железокобальтовый феррит (CoFe_2O_3), диоксид хрома CrO_2 . В однослойных лентах магнитный порошок вводится непосредственно в основу, однако магнитные свойства таких лент хуже.

Известно применение гибких дисков и валиков (на основе эластичных материалов – резины, пластмассы и т.п.), металлических лент, содержащих два рабочих слоя с разной коэрцитивной силой (это позволяет работать и в средних, и в больших намагничивающих полях), других специальных лент.

Преимущества магнитографии:

- лента легко деформируется, поэтому можно контролировать сложные конфигурации изделий, например сварные швы с валиком;
- процессы записи и считывания разнесены в пространстве и времени, поэтому запись можно осуществлять в сложных условиях (например, под водой), а считывание, требующее участия электронных приборов, – в нормальных условиях;
- лента является документом.

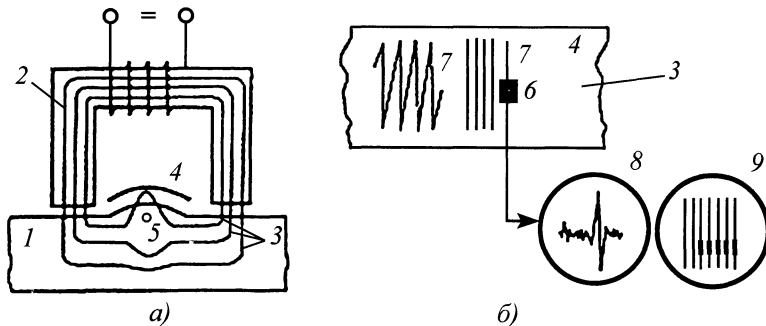


Рис. 6.1. Процесс магнитографической дефектоскопии:

а – запись; *б* – воспроизведение; 1 – объект контроля; 2 – электромагнит; 3 – магнитно-силовые линии; 4 – лента; 5 – дефект; 6 – преобразователь; 7 – линия сканирования; 8, 9 – представление информации

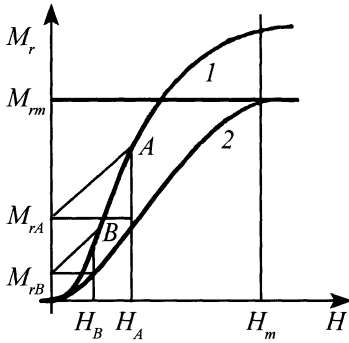


Рис. 6.2. Основная магнитная характеристика $M_r(H)$ ленты

Вместе с тем, есть один специфический недостаток (который при правильном понимании можно превратить в преимущество): лента как промежуточный носитель информации является существенно нелинейным звеном. Остановимся на этом вопросе более подробно.

6.2. ЗАПИСЬ НА ЛЕНТУ

На ленту записывается магнитное поле дефекта. Установим, соответствует

ли записанное поле (или поле отпечатка) исходному полю дефекта и можно ли распространить на поле отпечатка те сведения, которые накоплены при исследовании полей различных дефектов.

Одна из важнейших магнитных характеристик ленты – функция $M_r(H)$. На рис. 6.2 показана кривая намагничивания 1 некоторой ленты. Если довести ленту до насыщения полем H_s , а затем его отключить, то лента будет иметь максимальную остаточную намагниченность M_{rm} . Но если лента намагничена полем H_A или полем H_B , то остаточная намагниченность соответственно будет равна M_{rA} и M_{rB} . Кривая 2 на рис. 6.2 характеризует зависимость $M_r(H)$.

Теперь обратимся к рис. 6.3. Он состоит из четырех частей (I–IV). Справа внизу (I) изображено поле дефекта в очень упрощенном виде – в форме треугольника в координатах $H_x(x)$. Справа вверху (II), также в очень упрощенной аппроксимации, даны кривые $M_r(H)$ для лент 1, 2.

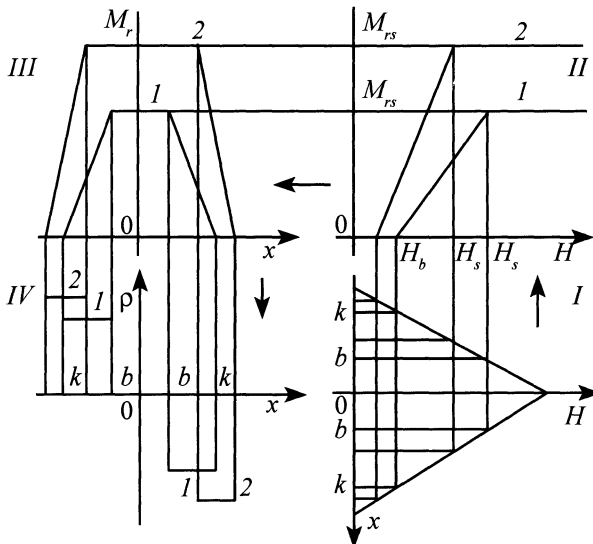


Рис. 6.3. Запись поля дефекта (I) на ленте с характеристиками 1 и 2 (II), остаточная намагниченность (III) и поляризация (IV) лент

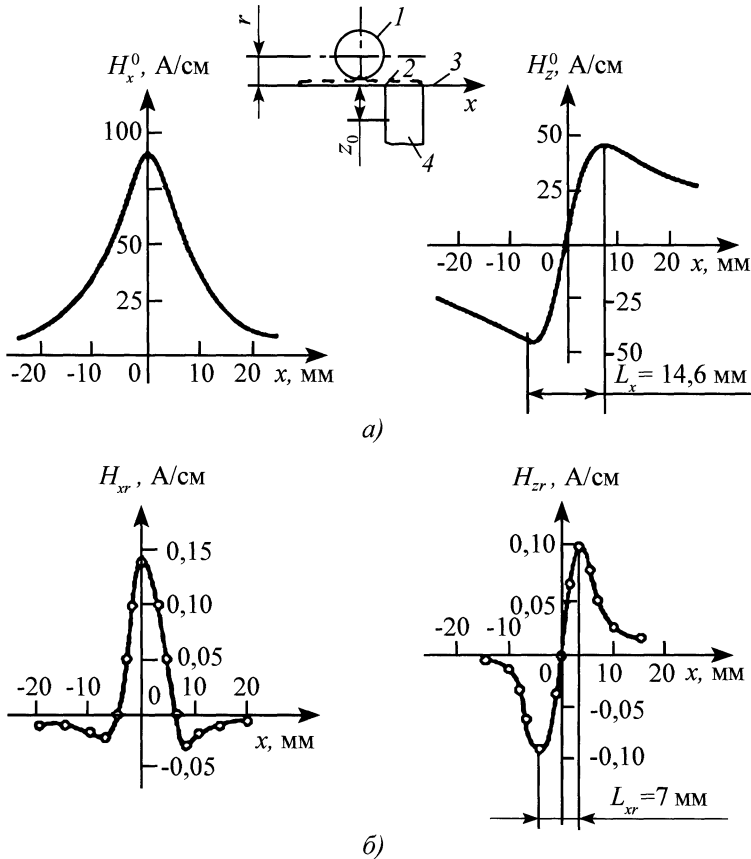


Рис. 6.4. Топография исходного (а) и отображенного лентой МК-2 (б) полей:

1 – провод; 2 – прокладка; 3 – лента; 4 – феррозонд; высота провода $r = 6 \text{ мм}$; $z_0 = 1,3 \text{ мм}$; сила тока $I = 425 \text{ А}$

Рассмотрим ленту 1. Несмотря на то, что поле дефекта до воздействия H_n существует, это не оставит отпечатка на ленте, так как $M_r = 0$ при $H \leq H_n$. Поле дефекта изменяется при $H \geq H_s$, однако M_r не меняется, поскольку $M_r = M_{rs} = \text{const}$ при $H \geq H_s$. Отметим, что H_0 соответствует полю дефекта при некоторой координате $x = \pm k_1$, а H_s – при координате $\pm b$. Таким образом, на ленте M_r будет изменяться от $x = \pm k_1$ до $x = \pm b_1$. На участке от b_1 до b_2 будет $M_r = M_s$ (см. III на рис. 6.3). Там, где меняется M_r (IV), образуются заряды, величина которых $\rho(x) = -\mu_0 dM_r/dx$.

Теперь можно рассчитать напряженность поля, которое заряды создают в ок-

ружающем пространстве. Но прежде отметим одно важное обстоятельство: проведя те же построения для ленты 2, получим другую систему зарядов, отличающуюся по величине и расположению, и соответственно, другое поле отпечатка. Поскольку заряды теперь расположены вдоль ленты (а у дефекта – по вертикальным граням), то поле отпечатка обеих лент будет отличаться от записанного поля и по топографии, и по величине. Поле отпечатка на ленте

$$H_x = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \ln \frac{[(x-k)^2 + z^2] [(x+k)^2 + z^2]}{[(x-b)^2 + z^2] [(x+b)^2 + z^2]}; \quad (6.1)$$

$$H_z = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \left(\operatorname{arctg} \frac{k+x}{z} - \operatorname{arctg} \frac{k-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{b-x}{z} - \operatorname{arctg} \frac{b+x}{z} \right). \quad (6.2)$$

6.3. ЗАПИСЬ В ПРИЛОЖЕННОМ ПОЛЕ

Для наглядности рассмотрим два предельных случая: внешнее (намагничивающее) поле $H_{\text{внеш}} = H_n$ и $H_{\text{внеш}} = H_s$. Поле дефекта H_x аппроксимируем также прямыми, но с учетом всех экстремумов. Разумеется, при $H_{\text{внеш}} = H_s$ поле дефекта больше, чем при $H_{\text{внеш}} = H_n$. На рис. 6.5, а все построения (I–IV) выполнены в соответствии со схемой на рис. 6.3. При этом для дефекта 1 получается поверхностный диполь, аналогичный рассмотренным выше, а для дефекта 2 – суперпозиция из двух диполей разных знаков. Результирующее поле отпечатка дефекта 2 показано на рис. 6.5, б.

На рис. 6.4 показаны экспериментальные данные по записи поля провода с током на ленту МК-2. Они достаточно рельефно характеризуют отличия исходного поля от поля отпечатка, причем здесь не столько принципиально отличие по величине полей, сколько по топографии.

Итак, на напряженность и топографию поля отпечатка влияют: крутизна характеристики ленты dM_r/dH ; параметр M_{rs} ленты; размер участка H_n-H_s ; значение H_n .

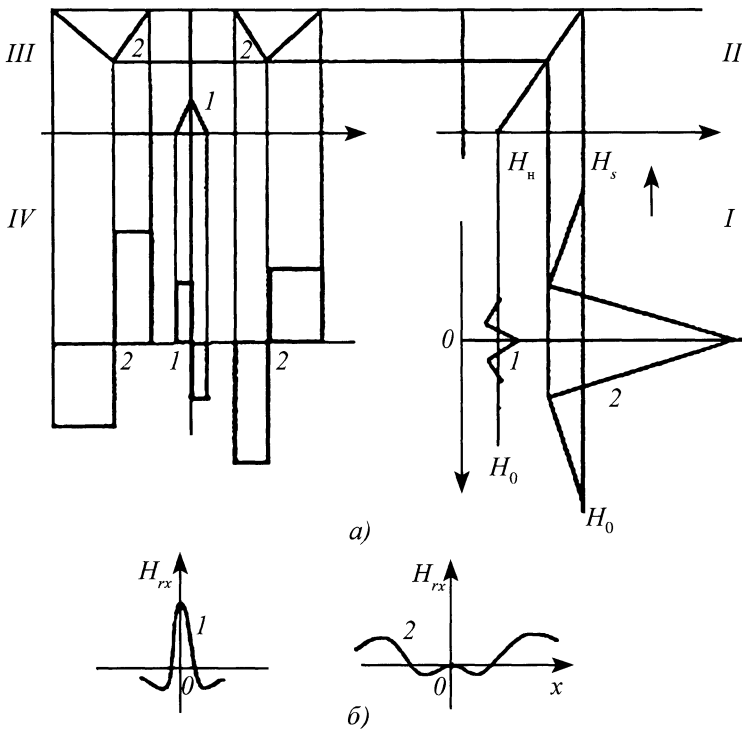


Рис. 6.5. Запись поля дефекта при разных значениях H_0 (дефект 2 значительно больше дефекта 1)

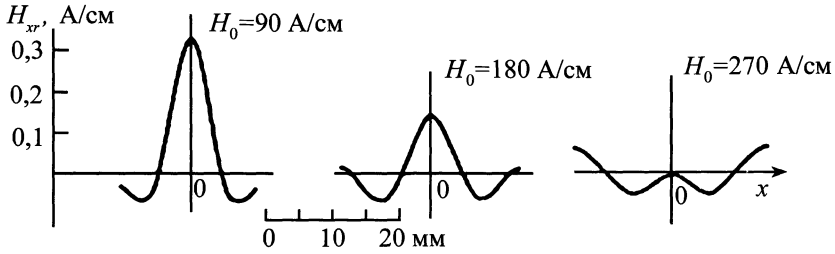


Рис. 6.6. Запись поля дефекта с параметрами $2b = 0,25$ мм и $h = 2$ мм при разных значениях H_0 (эксперимент)

Эксперимент полностью подтверждает эту схему. На рис. 6.6. показано поле отпечатка наружной щели шириной 0,25 мм и глубиной 2 мм при записи на ленту МК-2 для разных H_0 . При напряженности H_0 , равной 180 и 270 А/см, поле дефекта значительно превышает H_s . Зависимость $H_d(H_0)$ имеет вид кривой с насыщением, а поле отпечатка $H_r(H_0)$ на любых лентах имеет максимум.

Случаи, показанные на рис. 6.5, приведены для того, чтобы предупредить о необходимости правильного выбора лент и режимов контроля. Еще более внимательного подхода требует контроль сварных швов с валиком усиления, поскольку валик создает поле, противоположное полю дефекта.

На рис. 6.7, а показано поле валика H_{ib} , оно имеет обратный знак и достаточно большую величину ($H_0 = H_b$). На рис. 6.7, б приведены поля дефектов 1–3 при разной глубине залегания (чем больше номер кривой, тем больше глубина залегания); их суперпозиция представлена на рис. 6.7, в. Видно, что поверхностные (и подповерхностные) дефекты хорошо различимы, а глубинный дефект приводит только к общему поднятию кривой (см. рис. 6.7, а). Отображение на магнитной ленте не улучшает общую ситуацию, однако существуют приемы (и могут быть предложены еще), позволяющие в конечном счете с той или иной степенью достоверности выявлять дефекты под валиком сварного шва.

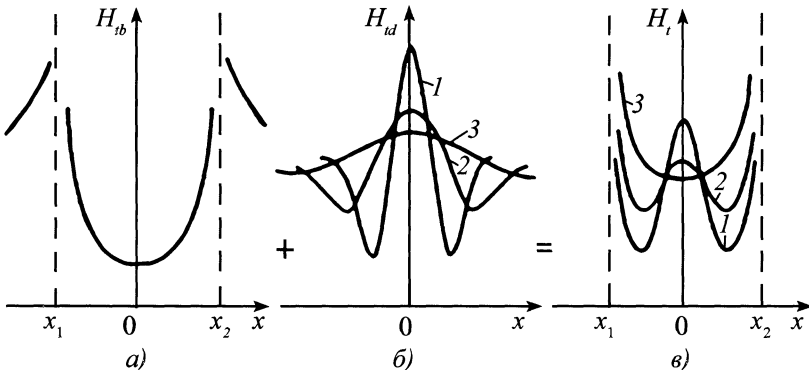


Рис. 6.7. Распределение поля над валиком (а), дефектами на разной глубине (б) и суммарное (в)

6.4. МАГНИТНЫЕ ЛЕНТЫ

Для отечественных и зарубежных магнитных лент разных типов линейный участок кривой остаточной намагниченности, характеризующий максимальной крутизной, которая определяет чувствительность к изменению регистрируемого магнитного поля, находится в интервале полей от 100 ... 300 до 400 ... 600 А/см.

В целях надежного выявления мелких (например, когда ширина дефекта не более 5 %) внутренних дефектов контролируемые изделия иногда необходимо намагничивать полем напряженностью свыше 500 А/см. При такой напряженности магнитного поля низкокоэрцитивные ленты (типа МК-1, МК-2) насыщаются и становятся нечувствительными к дополнительным магнитным полям рассеяния от дефектов.

Чтобы повысить надежность и расширить границы применения магнитографической дефектоскопии (для контроля качества материалов и изделий из углеродистых и легированных сталей, для контроля материалов и изделий с толщиной стенки более 25 мм) целесообразно применять высококоэрцитивные магнитные ленты (табл. 6.1).

Низкокоэрцитивные ленты (МК-1, МК-2) следует использовать при контроле изделий толщиной до 10 мм. Это объясняется тем, что приложенное намагничивающее поле, не промагничивая изделие на всю толщину, насыщает магнитные ленты этого типа. При толщине контролируемого изделия 10 ... 20 мм эффективнее применять среднекоэрцитивные ленты типов 6 и ТЛЦ.

6.1. Характеристики магнитных лент

Тип ленты	Основа		Магнитный слой		
	Материал	Толщина, мкм	Толщина, мкм	Коэрцитивная сила, А/см	Остаточная индукция, Тл
МК-2	Лавсан	25 ... 30	20	80	0,05
6	Триацетат-целлюлоза	40	16	≥ 175	≥ 0,10
ТЛЦ-2	Лавсан	25	12	265	0,09
А	«	25	12	320	0,10
Б	«	21	6	370	0,12

6.5. МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ

Магнитографический дефектоскоп состоит из намагничивающего и считывающего (воспроизводящего) устройств. Последнее часто называют видеоконтрольным устройством (ВКУ), а еще чаще – собственно дефектоскопом.

Для контроля сварных соединений трубопроводов применяют намагничивающие устройства, состоящие из П-образ-

ного электромагнита. Эти устройства подразделяют на две группы:

1) подвижные устройства (рис. 6.8), позволяющие намагничивать стыковое соединение в процессе непрерывного или шагового перемещения по периметру трубы вдоль сварного шва;

2) неподвижные устройства (рис. 6.9), позволяющие намагничивать одновременно весь периметр стыкового шва или его значительную часть с одной установки.

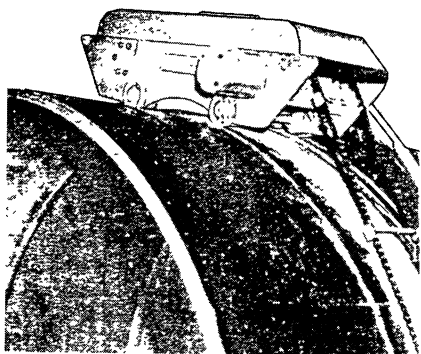


Рис. 6.8. Шаговое намагничивающее устройство "Шагун-М1"

Намагничивающие устройства обычно имеют полюсы с радиусом кривизны, которые обеспечивают равномерный зазор между поверхностью трубы и полюсами подвижного устройства с непрерывным перемещением или плотным прилеганием полюсов неподвижного устройства к поверхности трубы для намагничивающего сварного соединения без зазора.

ВКУ, или собственно магнитографический дефектоскоп, включает лентопротяжный механизм, вращающийся преобразователь (чаще всего – магнитная головка), системы обработки и представления информации. В дефектоскопах индикация сигналов с магнитограмм воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

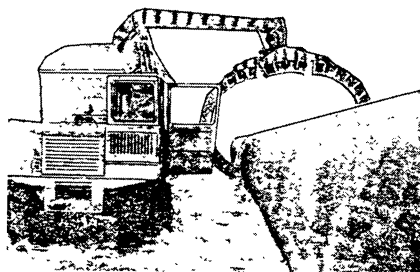


Рис. 6.9. Механизированное кольцевое намагничивающее устройство передвижной магнитографической лаборатории ЛПМ-К

При контроле стыковых сварных швов трубопроводов из ферромагнитных сталей магнитографический метод позволяет выявить:

- наружные и внутренние трещины, непровары и несплавления по кромкам размером свыше 5 % толщины стенки труб;
- цепочки шлаковых включений и пор размером 10 % и более толщины стенки трубы, ориентированных преимущественно вдоль шва, при расстоянии между соседними дефектами менее трехкратного размера наименьшего из шлаковых включений или пор.

При контроле стыковых швов, выполненных односторонней сваркой с V-образной разделкой кромок труб, этот метод гарантирует выявление следующих дефектов:

- корневые непровары и трещины, вертикальный размер которых менее 5 % толщины стенки трубы;
- одиночные шлаковые включения и газовые поры в корне шва, имеющие относительную величину менее 15 %, при расстоянии между отдельными шлаковыми включениями или порами вдоль шва более двух толщин стенки трубы.

На рис. 6.10 показаны два вида (I, II) индикации участков сварного шва с характерными дефектами.

Магнитотелевизионный дефектоскоп МТД-3ЛП предназначен для расшифровки магнитограмм, записанных на ленте шириной до 50 мм, при магнитографическом методе контроля качества сплошности стыковых сварных соединений тонкостенных (до 20 мм) конструкций из ферромагнитных материалов. С его помощью можно выявлять в сварных соединениях трещины, непровары, поры и шлаковые включения. По телевизионному изображению магнитного рельефа сварного шва определяют тип, форму и местоположение обнаруженного дефекта. Устройство дефектоскопа предусматривает возможность детального изучения на экране осцилло-

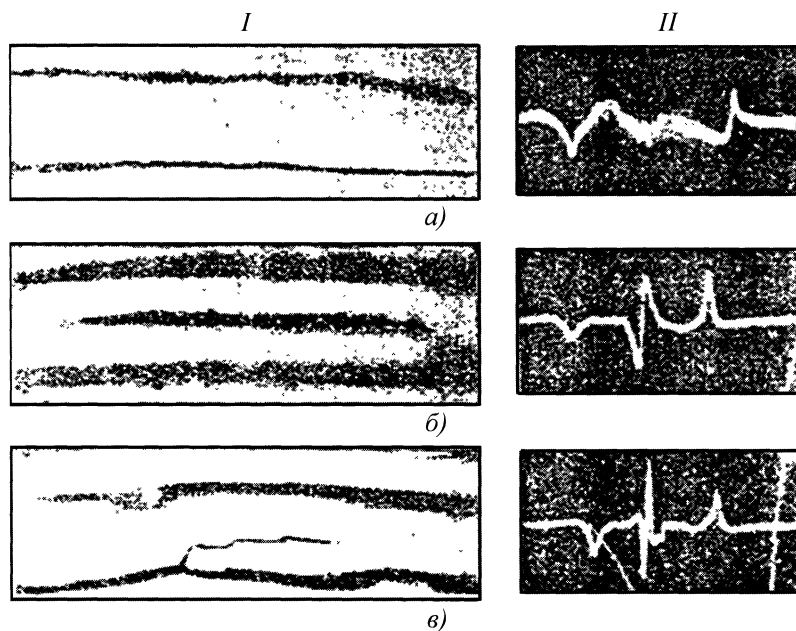


Рис. 6.10. Яркостная (I) и импульсная (II) индикации (кадры) участков сварного шва:

a – без дефектов; *б* – с непроваром в корне; *в* – с трещиной

графа отдельных участков контролируемого сварного соединения и получения количественных характеристик изображения.

Для испытания четырехгранных стальных заготовок с длиной ребра от 50×50 до 200×200 мм магнитографическим методом служит устройство 9.140–9.143 (Институт д-ра Ферстера). Намагничивание производится переменным полем.

Для контроля цилиндрических изделий предложен магнитографический дефектоскоп со скользящим носителем (рис. 6.11). В этом устройстве запись поля дефекта осуществляется практически без зазора между изделием и лентой. Эластичные свойства ленты обеспечивают эффективное отслеживание состояния контролируемой поверхности, не требуя строгой ориентации дефектоскопа по отношению к изделию и ожидаемому направлению дефектов.

Возможность задать любое огибание изделия лентой (вплоть до 180°) позволяет упростить процесс сканирования поверхности и существенно сократить время контроля. Следует отметить и высокую устойчивость магнитографических средств дефектоскопии к помехам электрического происхождения, поскольку воздействовать на ленту они принципиально не могут. Указанные особенности делают магнитографический контроль высокочувствительным, достоверным и технологичным.

Дефектоскоп работает следующим образом.

Магнитная лента 2 в виде бесконечной петли протягивается относительно контролируемого изделия с помощью вращающегося обрезиненного ведущего ролика 4 за счет фрикционного сцепления с ним. Ролик жестко насажен на ось при-

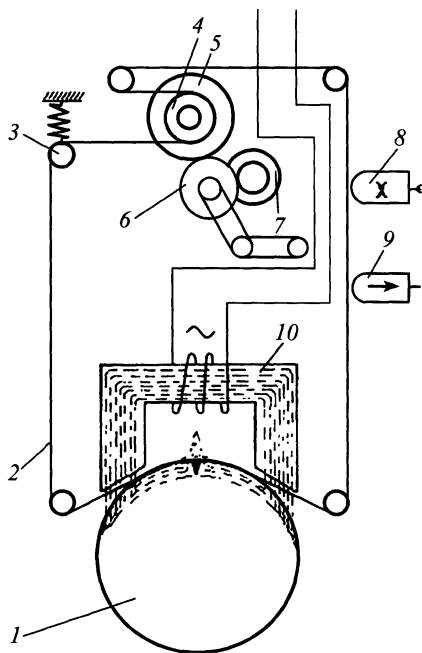


Рис. 6.11. Функциональная схема магнитографического дефектоскопа со скользящим носителем:

1 – контролируемое изделие; 2 – магнитная лента; 3, 4, 6 – натяжной, ведущий и промежуточный ролики; 5 – шкив; 7 – электродвигатель; 8, 9 – стирающая и воспроизводящая головки; 10 – намагничивающее устройство

водного узла со шкивом 5, вращение которого осуществляется от электродвигателя 7 через обрезиненный промежуточный ролик 6. Пять обводных свободно вращающихся роликов, в том числе натяжной 3, служат для формирования рабочих участков петли ленты и обеспечения требуемого охвата ею контролируемой поверхности. От степени охвата изделия лентой зависит локальность и производительность контроля.

Возбуждение в изделии магнитного поля производится П-образным электромагнитом, питаемым током промышленной частоты.

Образовавшиеся в местах нарушения сплошности металла магнитные потоки рассеяния записываются на ленту и считываются с нее воспроизводящей головкой 9. Далее по ходу движения лента размагничивается стирающей головкой 8. В настоящее время, к сожалению, магнитографические дефектоскопы не находят широкого применения в промышленности. Это связано, в первую очередь, с прекращением выпуска магнитных лент.

ИНДУКЦИОННЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ

Дефектоскопы, у которых в качестве входного преобразователя используются пассивные индукционные катушки, применяют для контроля качества изделий из ферромагнитных материалов. Они отличаются простотой устройства, повышенной надежностью и удобством эксплуатации.

Для контроля бесшовных горячекатаных ферромагнитных труб создана установка, действие которой основано на определении градиента магнитного поля дефекта при циркулярном способе намагничивания. Значение градиента в этом случае достаточно большое, поэтому при дефектоскопическом контроле труб необязательно применять преобразователи с максимально возможной абсолютной чувствительностью к градиенту магнитного поля, так как основной характеристикой дефектоскопа является отношение сигнала от дефекта к сигналу основного мешающего фактора.

При обнаружении дефектов горячекатаных труб магнитным методом основным мешающим фактором является наклеп, магнитное поле которого соизмеримо по величине с полем недопустимого дефекта и близко к нему по топографии. Даже при намагничивании в приложенном постоянном магнитном поле отношение максимумов градиентов нормальной составляющей поля волосовины глубиной 0,6 мм и участка изделия, нагартованного роликами правильного стана, может не превышать трех. Это позволяет применять индукционный преобразователь в условиях поточного автоматизированного контроля качества горячекатаных труб.

Преобразователи и полюсные башмаки электромагнита прикреплены к ползунам, свободно перемещающимся в направляющих ротора вращающегося кон-

трольного устройства. Ползуны синхронно перемещаются в радиальном направлении с помощью колеса, имеющего пазы, выполненные по профилю архимедовой спирали, и сегментов, смонтированных в ползуны.

Сигнал с индукционных преобразователей усиливается вращающимся вместе с системой намагничивания предусилителем и проходит через бесконтактный трансформаторный токосъем. Затем он поступает на усилитель с регулируемым ограничителем сигнала по амплитуде и на автоматический сигнализатор дефектов.

В дефектоскопах используется схема автоконтроля работоспособности преобразователя и измерительной схемы аппаратуры.

Обнаруживаются поверхностные дефекты глубиной более 0,22 мм, а также подповерхностные дефекты труб в процессе движения. Наилучшие результаты при высокопроизводительном контроле холоднокатаных полос получены с помощью индукционных магнитных установок.

Автоматизированный дефектоскоп является универсальной установкой, способной контролировать холоднокатаные полосы шириной 560 ... 2500 мм в производственных линиях агрегатов поперечной резки при скорости до 5 м/с. Установка включает: систему намагничивания контролируемой полосы – полюсные электромагниты; систему сканирования полосы индукционными преобразователями – блоки съема сигналов; аппаратуру обработки информации – приборную стойку с усилительно-регистрирующими блоками, блоком питания и блоком наблюдения.

Статистика показывает, что около 80 % всех дефектов (типа плен, царапин, строчечных неметаллических включений, вкатанной окалины и т.п.) вытянуты вдоль

направления прокатки и движения полосы. Наилучшие условия для их выявления (образование максимальных магнитных полей дефектов и их градиентов) достигаются при контроле в приложенном поле, имеющем направление, поперечное вытянутости дефекта. Поэтому при контроле центральной части полосы, в которой встречается до 70 % всех дефектов, требуется максимальная чувствительность. Полоса намагничивается и сканируется индукционным преобразователем в поперечном направлении, а ее края (где из-за краевого эффекта невозможно применить поперечные намагничивание и сканирование) – в продольном.

Конструктивно система намагничивания выполнена в виде электромагнитов, которые располагаются под контролируемой полосой. Электромагниты создают приложенное магнитное поле – поперечное и продольное.

Считывание полей дефектов осуществляется расположенными над полосой индукционными преобразователями путем сканирования ими полосы в направлении приложенного поля в межполюсном пространстве электромагнитов. Поперечное сканирование обеспечивается вращением преобразователей, установленных на дисках по окружности диаметром 300 мм, близким по размеру к межполюсному расстоянию электромагнита. При этом рабочая зона в поперечном направлении составляет $3/4$ диаметра. Частота вращения преобразователей (2500 мин^{-1}) выбрана из условия выявления минимального по длине дефекта при максимальной скорости движения полосы. Продольное сканирование краев полосы в межполюсном пространстве электромагнитов осуществляется неподвижными преобразователями за счет движения полосы.

Вращающиеся и неподвижные индукционные преобразователи образуют систему сканирования, которая конструктивно состоит из блоков съема сигнала с вращающихся преобразователей и блоков

съема сигнала с неподвижных преобразователей. Каждый преобразователь состоит из двух цилиндрических катушек с ферритовыми сердечниками, включенных дифференциально. Съем сигнала с вращающихся преобразователей – бесконтактный, через индукционный токосъем. На диске установлено шесть усилителей для предварительного усиления сигнала.

Неподвижные преобразователи выполнены в виде двух вытянутых по ширине полосы рабочих катушек, намотанных на нетокопроводящие пластины и включенных дифференциально. Рамки установлены с базой 3,5 мм.

В установке применена амплитудная обработка сигналов с частотной отстройкой от мешающих факторов, при этом каждый преобразователь имеет свой независимый измерительный канал.

Благодаря независимости работы каналов значительно повышается надежность работы установки, так как выход из строя одного из измерительных преобразователей не влечет за собой прекращение работы всей системы контроля, а приводит лишь к потере чувствительности на небольшом участке полосы.

Отстройка от сигналов мешающих факторов (локальный наклеп, удары, изменение зазоров и др.) выполняется с помощью частотной обработки сигнала.

Автоматическое ограничение осуществляется подачей на разделительные диоды постоянных запирающих напряжений, меняющихся в соответствии с изменением уровня шума. Запирающие напряжения, автоматически меня уровень ограничения сигнала снизу, поддерживают постоянной амплитуду сигнала от дефекта на выходе схемы при изменении зазора, скорости движения полосы и некоторых других факторов.

Механическая часть установки, состоящая из системы электромагнитов и блоков съема сигнала, встраивается в линию агрегата поперечной резки полос на листы перед правильной машиной и барабанными ножницами. Электромагниты

устанавливают под полосой так, что они обеспечивают намагничивание полосы по всей ширине. Так как полоса притягивается к полюсам магнита, то для предотвращения механического повреждения ее нижней поверхности на полюсы ставят латунные проводки. Электромагниты за счет силы притяжения уменьшают колебания полосы в вертикальной плоскости, что значительно улучшает условия контроля и повышает его надежность.

Основные технические характеристики установки следующие: объект контроля – холоднокатаные полосы из низкоуглеродистых сталей толщиной 0,5 ... 2,5 мм; выявляемые дефекты – сварной шов, рваная кромка, дыра, плена, раковина, вдавлена, царапина, вкатанная окалина и другие нарушения сплошности металла глубиной более 5 % от толщины полосы. Рабочий зазор между индукционными преобразователями и полосой составляет 3 ... 5 мм.

С учетом роста скоростей производственных процессов индукционные дефектоскопы будут находить все большее применение, так как их чувствительность прямо пропорциональна увеличению скорости движения изделия.

Для обнаружения сварного шва в прокатанных полосах, поступающих на дальнейшую обработку в высокоскоростных листопркатных станах, предназначен магнитно-индукционный индикатор. Он позволяет определить наличие шва шириной 2 ... 5 мм в горячекатаных полосах из низкоуглеродистых сталей шириной 700 ... 1850 мм и толщиной 1,2 ... 6 мм в линиях непрерывного производства жести со скоростью до 10 м/с для автоматического замедления прокатного стана при прокатке

участка полосы со сварным швом.

Принцип действия прибора основан на регистрации индукционными преобразователями нормальной составляющей магнитного поля рассеяния сварного шва, возникающего при продольном намагничивании контролируемой полосы постоянным магнитным полем. Намагничивание осуществляется полюсным электромагнитом. Считывание полей рассеяния производится неподвижными индукционными преобразователями. Прибор имеет четыре преобразователя, каждый из которых состоит из двух катушек индуктивности, включенных дифференциально. Это обеспечивает сравнение двух соседних участков полосы и отстройку от структурной и магнитной неоднородностей металла швов вдоль изменяющейся по ширине и длине полосы.

Отстройке от магнитной неоднородности способствует также сильное намагничивание полосы однородным постоянным полем. Достаточно сильное поле намагничивания позволяет получать значительное по абсолютной величине поле рассеяния, что дает возможность размещать преобразователи с одной стороны полосы.

В приборе используются амплитудная обработка сигналов и автоматическое ограничение сигнала по уровню шума в каждом преобразователе по числу каналов. Электромагнит служит для намагничивания полосы до состояния, близкого к техническому насыщению, а также для уменьшения вертикальных биений полосы в зоне контроля за счет притяжения к полюсам. Преобразователь состоит из двух катушек индуктивности, включенных дифференциально.

МАГНИТНЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СТенок ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

Магнитный метод неразрушающего контроля нашел широкое распространение благодаря высокой производительности и получению достоверной информации о состоянии стенок трубопроводов и резервуаров практически в реальном режиме времени. К преимуществам метода относится и то, что не требуются (или предусматривается минимум) работы по подготовке контролируемой поверхности.

Появились установки и приборы магнитного метода контроля, эффективно работающие в нефтегазовой и химической промышленности, в теплоэнергетике.

В настоящее время наиболее распространенным, быстрым и надежным является метод *рассеянного магнитного потока* MFL (рис. 8.1).

Принцип метода заключается в локальном намагничивании объекта контроля и фиксации магнитных полей рассеяния, вызванных нарушением сплошности и утонением контролируемого изделия. Принцип получил развитие в середине 1960-х годов, причем для детектирования изменений магнитного потока, вызванных дефектом, использовали пассивные преобразователи (индукционные). В дальнейшем чаще стали использовать преобразователи Холла.

В связи с развитием технологии изготовления мощных постоянных магнитов (в частности, на основе неодима-железобора), появилась возможность создания компактных сканирующих устройств, что позволило локально намагничивать зону контроля при толщине стенок до 16 мм. Дальнейшее увеличение толщины стенки контролируемого изделия предполагает существенное увеличение габаритных

размеров и массы сканеров, что усложняет их использование при оперативном контроле. Еще одной проблемой является применение пассивных преобразователей рассеянного поля, фиксирующих информацию на поверхности контролируемого изделия, что усложняет определение типа дефекта (поверхностный, внутренний) и приводит к перебраковке изделий. Значительное влияние на величину сигнала преобразователя оказывает изменение расстояния между преобразователем и контролируемой поверхностью.

В целях увеличения диапазона приборов MFL целесообразно применять иной тип преобразователя в сочетании с другим электронным оборудованием. Улучшенный метод вместо пассивных преобразователей Холла предусматривает применение вихретоковых преобразователей, которые улавливают изменения магнитной индукции внутри материала.

Для отличия от традиционного метода MFL введено понятие SLOFEC (Saturation Low Frequency Eddy-Current). Фирма Kontroll Technik (Германия) обладает интеллектуальной собственностью на эту технологию.

Применение метода низкочастотных вихревых токов кроме высокой чувствительности к дефектам имеет еще одно неоспоримое преимущество перед пассивными преобразователями – информацию о глубине залегания дефекта. Это объясняется тем, что благодаря подмагничиванию вихревые токи проникают в глубь контролируемой стенки изделия, что, в свою очередь, выражается в изменении фазы сигнала вихревого преобразования в зависимости от глубины залегаемого дефекта.

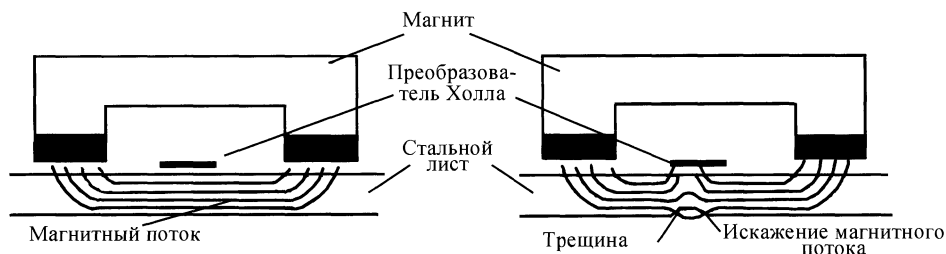


Рис. 8.1. Принцип метода рассеянного магнитного потока MFL

Использование фазового метода обработки информации и локального подмагничивания (выравнивающие обычно существующие локальные неоднородности) существенно повышают основной параметр контроля – соотношение сигнал/шум. Кроме того, использование фазы в качестве информативного параметра снижает влияние вариации расстояния между преобразователем и поверхностью контролируемого изделия. Данный метод наряду с ферромагнитными изделиями позволяет контролировать изделия из неферромагнитных материалов (коррозионно-стойкая сталь, алюминий и т.д.). Сравнительные возможности метода рассеянного магнитного потока (MFL) и использования низкочастотных вихревых потоков (SLOFEC) иллюстрирует рис. 8.2.

Укажем преимущества и недостатки того и другого метода.

К преимуществам метода MFL относятся быстрдействие, надежность, достаточно простое решение по конструированию многоканальных систем. Его недостатки – отсутствие прямой информации о глубине залегания дефекта; временные, конструктивные и технологические трудности по созданию систем, позволяющих контролировать изделия с толщиной стенки свыше 16 мм.

Для метода SLOFEC преимуществом является получение прямой информации о глубине залегания дефекта благодаря применению вихревых преобразователей, а также существенное повышение соотношения сигнал/шум за счет исполь-

зования в качестве информативных параметров амплитуды и фазы сигнала вихревых датчиков. Однако, в связи с использованием низкочастотного сигнала, для получения максимальной фазовой информации необходимо использовать преобразователи большого диаметра, что существенно снижает локальность контроля и требует достаточно сложной и высокопроизводительной (мощной) системы формирования приема и обработки информации.

Разработаны приборы для контроля коррозионных дефектов типа утонения стенки, точечной коррозии, трещин на внутренней поверхности стенок экранных трубок теплообменников, трубопроводов химической промышленности, магистральных нефтегазопроводов. Эти приборы позволяют проводить контроль без удаления изоляционного покрытия и остановки работы оборудования, что дает возможность повысить производительность и уменьшить затраты на проведение контроля по сравнению с традиционными методами.

В России создан ряд приборов типа МИТ-1/2, принцип действия которых основан на сканировании ферромагнитного объекта контролем постоянным магнитным полем и на индикации полей рассеяния, вызванных нарушениями сплошности и изменением геометрии стенок объекта.

Сканирующее устройство (сканер) включает П-образную магнитную систему, от одного до восьми преобразователей Холла (один канал), систему подъема и опускания на контролируемую поверхность, систему перемещения и установки

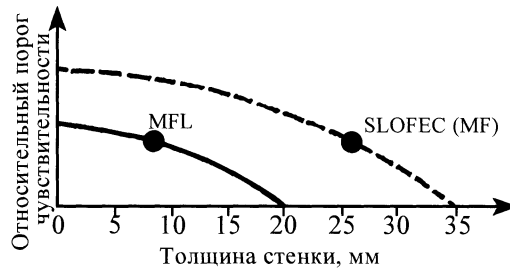


Рис. 8.2. Сравнение относительной чувствительности методов MFL и SLOFEC

требуемого зазора на контролируемой поверхности, разъемы для подключения электронного блока и осциллограф.

О глубине обнаруженного дефекта в контролируемом изделии можно судить по амплитуде сигнала от дефекта, сравнивая ее с амплитудой на образце. Имеется возможность сохранения полученной информации в памяти осциллографа. Применение цифрового осциллографа позволяет визуально оценивать тип дефекта (поверхностный, внутренний) по пространственному распределению, что существенно снижает риск перебраковки.

Другой тип прибора – это *8-канальный дефектоскоп*, который состоит из сканера и персонального компьютера типа Notebook (далее – ПК), связанных гибким кабелем, программного обеспечения приема, обработки, индикации результатов контроля, тестирования дефектоскопа. Отличительные особенности такого прибора, обусловленные использованием системы позиционирования:

- точное определение пройденного пути контроля и месторасположения дефекта;
- независимость определения координат от скорости сканирования, что особенно важно при ручном сканировании;

- возможность с высокой точностью идентифицировать пространственное распределение рассеянного магнитного поля от дефекта, что позволяет определять вид дефекта (поверхностный, внутренний) и практически исключить перебраковку в процессе контроля.

Возможности программного обеспечения:

- проведение автоматической калибровки каналов измерения;
- представление трехмерного изображения дефектов;
- наличие двух режимов представления информации;
- при больших объемах контроля – запись результатов контроля в память ПК с повышенной скоростью сканирования (контроля);
- контроль в реальном режиме времени с одновременным просмотром результатов контроля на экране монитора;
- распознавание поверхностных и внутренних дефектов, что позволяет избежать перебраковки контролируемых изделий.

МАГНИТНЫЕ СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ И ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ

9.1. ВНУТРИТРУБНЫЕ МАГНИТНЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ-СНАРЯДЫ

Общая протяженность трубопроводов в России превышает 300 тыс. км. Более половины из них – газопроводы. Для обеспечения бесперебойной работы трубопроводного транспорта нефти и газа ежегодно ремонтируется 1,5 тыс. км трасс с затратами до 200 млн р. Использование дефектоскопов и средств диагностики позволяет существенно сократить затраты на ремонт и обслуживание трубопроводных трасс.

Зарубежные фирмы – держатели нефте- и газопроводов для их обследования широко используют снаряды-дефектоскопы. По данным фирмы AMF Tuboscope (США), обследование 1 км трубопровода стоит 5 тыс. долл., если содержание сероводорода в газовой среде не превышает 1 %. Обследование подземного трубопровода диаметром 800 мм, протяженностью 1 км стоит 8,5 тыс. долл., а в морских условиях 10,3 тыс. долл. США.

Фирмы-разработчики средств диагностики трубопроводов предпочитают эксплуатировать свою технику. Так, упомянутая выше фирма AMF Tuboscope, занимающаяся разработкой снарядов-дефектоскопов с 1960-х годов, является ведущей по их практическому использованию. Она осуществляет диагностические работы на трубопроводах в Северной и Южной Америке, Европе, Африке и на Ближнем Востоке. Высокая эффективность использования средств технической диагностики трубопроводов и большая потребность в них обусловили то, что все большее число зарубежных фирм включается в создание средств контроля трубо-

проводов.

Разработкой дефектоскопов для контроля действующих трубопроводов без прекращения транспортирования продукта впервые начали заниматься в 60-х годах прошлого века. Первые дефектоскопы предназначались для контроля нефтепроводов, так как не имели устройств компенсации сигналов при изменении скорости снаряда. Нефтепровод же обеспечивал плавное движение дефектоскопа.

Обработка и запись информации в цифровой форме впервые применены в 1983 г. в дефектоскопе серии Linalog для контроля трубопроводов диаметром 1420 мм.

Общими тенденциями развития средств технической диагностики трубопроводов нефти и газа являются:

создание конструкций дефектоскопов-снарядов, устойчивых к воздействию агрессивной среды, ударных и вибрационных нагрузок, пониженных и повышенных температур, давления до 10 МПа и др.;

разработка конструкций дефектоскопов-снарядов и аппаратуры для обработки информации, пригодных для диагностики трубопроводов разных диаметров и с разной толщиной стенок, с изменяющимся внешним контуром для прохождения изогнутых участков трубопровода и перепадов по внутреннему диаметру;

создание аппаратуры сервисного обслуживания и средств метрологического обеспечения дефектоскопов;

разработка средств съема и обработки информации с использованием новейших достижений в приборостроении и математических методов обработки информации с применением микропроцессорной техники и энергонезависимых носителей информации.

Дефектоскоп осуществляет продольное намагничивание стенок трубопровода с помощью системы кольцевых магнитных полюсов с гибкими полюсными наконечниками. Съем информации – тангенциальной составляющей магнитного поля дефектов – выполняется индукционными преобразователями, скользящими по внутренней поверхности. Метод обработки информации позволяет отстроиться от влияния изменения скорости движения в интервале 1 ... 6 м/с.

Информация о дефектах типа коррозии и эрозии, превышающих пороговые значения по площади и глубине, в виде аналогового электрического сигнала преобразуется в импульсные сигналы, амплитуда и длительность которых несут информацию о глубине и протяженности дефектов. Данные о дефектах регистрируются в накопителе информации, измеряющем амплитуды импульсов. Простота и надежность метода обработки информации в сочетании с оригинальным и удобным для дальнейшего анализа и хранения способом накопления информации позволяют успешно применять этот дефектоскоп уже в течение нескольких последних лет для контроля магистралей газопровода диаметром 1220 мм.

Представление информации, получаемой по 32 каналам преобразования, дает возможность использовать двухмерное информационное пространство для анализа в целях получения достоверных данных о дефектах всей поверхности трубопровода. Анализ информации по одному каналу позволяет на основании измеренных значений амплитуды и длительности импульсов (на определенном уровне) судить о глубине и протяженности дефектов. Анализ информации по нескольким каналам дает третье измерение дефекта. Необходимое и достаточное число используемых каналов для контроля всей поверхности трубопровода определяется исходя из свойств первичного преобразователя и допустимых размеров зоны кор-

розионного поражения, при которых сохраняется требуемый запас прочности.

Анализ сигнала по нескольким соседним каналам позволяет более точно представить дефект и картину распределения тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния дефекта H_x в объеме полупространства над ним. Знание качественного влияния размеров и формы дефекта и его количественной оценки на распределение величины H_x дает возможность применить вычислительные методы измерения параметров дефектов с высокой точностью.

Информация о состоянии поверхности трубопровода воспринимается 128 каналами преобразования тангенциальной составляющей полей рассеяния дефектов в электрические сигналы. Преобразователи фиксируют резкое изменение ΔH_x с любым знаком, при этом на выходе появляются импульсные сигналы разной полярности.

Последующая обработка аналогового сигнала проводится в цепях усиления, интегрирования, детектирования и суммирования сигналов противоположной полярности. Далее информация обрабатывается в цифровой форме.

В цифровом вычислительном блоке осуществляются: коррекция амплитуды сигнала по скорости; распознавание и исключение сигналов от поперечных и спиральных швов; распознавание сигналов, которые получены от флуктуаций магнитного поля, обусловленных технологическими элементами трубопровода, магнитными маяками; отстройка от шума; прекращение поступления информации в накопитель при превышении и снижении скорости движения дефектоскопа; группирование сигналов и выявление областей, пораженных коррозией; определение двухмерных координат дефектов; подсчет общего числа труб, а также числа труб с дефектами; формирование информации о состоянии трубопровода для ввода в накопитель.

Блок накопления осуществляет сбор, запись информации в цифровой форме.

Дальнейшая обработка информации ведется в региональном центре, в системе полной обработки и просмотра полученной информации, позволяющей оценить параметры дефекта и проследить его развитие при получении последующих данных о дефектности для составления долгосрочного прогноза состояния трубопровода.

Сложность задачи дефектоскопии газопровода с алгоритмической точки зрения обусловлена необходимостью обработки очень большого объема данных в режиме реального времени при жестких временных ограничениях.

Наличие сварных швов, магнитных маяков и технологических элементов трубопровода, также вызывающих резкое увеличение сигнала (и в этом смысле не отличающихся от дефектов), влечет за собой необходимость использования достаточно трудоемких алгоритмов анализа формы аномалий.

Рассмотрим последовательность операций обработки информации, обусловленную этими особенностями.

9.1.1. Выделение поперечных сварных швов

В отличие от других особенностей поперечные сварные швы можно легко выделить с помощью отсекания по порогу: если на некотором витке сканирования из 128 сигналов, снятых разными каналами, значения более 75 % превышают некоторое заданное значение, то в алгоритме принимается решение о наличии поперечного шва. Полученные значения сигналов исключаются, а информация о координатах шва сохраняется и используется в дальнейшем для корректировки местоположения преобразователей.

9.1.2. Сокращение объема обрабатываемой информации

В ходе движения преобразователей труба условно разбивается на участки длиной 1 м. На каждом таком участке со-

гласно алгоритму проводится подсчет среднего значения сигнала по всем каналам и точкам. Значения, не превышающие $(1,4 \dots 11,6)A_{\text{ср}}$, где $A_{\text{ср}}$ – амплитуда среднего значения, считаются соответствующими точкам, безопасным в отношении надежности; эти точки из дальнейшего рассмотрения исключаются. На последующую обработку поступают только те сигналы, амплитуда которых превышает указанный диапазон. По каждому каналу сохраняется несколько точек. Эта процедура наиболее трудоемкая.

9.1.3. Слияние точек

На этом этапе две выделенные точки, находящиеся вблизи друг от друга, объединяются в единую область, причем практически за один просмотр. На выход поступает ряд аномалий, встреченных на анализируемом участке трубы. Каждая из аномалий описывается следующими параметрами: координаты левой, правой, верхней и нижней крайних точек, входящих в пятно; площадь аппроксимирующего прямоугольника; сумма амплитуд, входящих в пятно сигналов; максимальное значение амплитуды.

9.1.4. Устранение технологических элементов трубопровода, магнитных маяков и спиральных сварных швов

Как уже отмечалось, часть выделенных областей может соответствовать аномалиям, не представляющим интереса с позиций диагностирования. Поскольку число таких аномалий может быть достаточно велико, в алгоритме предусматривается их автоматическое устранение, что выполняется методом сравнения со стандартными образцами с использованием контрольных точек. Стандартными образцами могут служить:

а) ромб строго определенной площади (магнитные маяки);

б) эллипсы, площадь которых соответствует одному из значений, указанных в имеющемся в алгоритме списке (ответвления трубопровода известных размеров);

в) прямоугольники с большой (не строго определенной) площадью, в которых особые точки идут строго по диагонали и под определенным углом (спиральные сварные швы).

Проверка осуществляется в следующем порядке:

1) площадь области сравнивается с площадью стандартных образцов (проверка вариантов *a* и *b*; если совпадения не обнаружены, алгоритм предусматривает переход к шагу 3);

2) проводится анализ значений ряда характеристических точек, расположенных внутри аппроксимирующего прямоугольника по обе стороны от границы стандартного образца; если наличие и отсутствие сигнала в этих точках соответствует стандартному образцу (точные значения сигналов не принимаются в расчет), делается вывод о том, что аномалия является магнитным маяком либо ответвлением трубопровода, и из дальнейшего анализа она исключается;

3) проверка на наличие спиральных сварных швов основана на том факте, что аппроксимирующий прямоугольник должен иметь достаточно большую площадь (поскольку шов идет вдоль всей трубы), а аномалии располагаются вдоль его диагонали. Поэтому в отличие от шага 1 площадь сравнивается не с площадью стандартного образца, а с пороговым значением. Аналогично указанным в шаге 2, контрольные характеристические точки расположены вдоль диагонали прямоугольника. Обнаруженные швы также исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Оставшиеся области считаются дефектами, представляющими большую или

меньшую опасность. Из их числа на каждом участке длиной 30 м выбираются пять наиболее опасных; информация об этих дефектах записывается в память. В качестве критерия, по которому отбирается группа наиболее опасных дефектов, используется функция, учитывающая площадь дефектов; максимальную глубину, получаемую на основании информации о максимальной амплитуде; сумму амплитуд точек, входящих в дефект.

В системе предусмотрена возможность интерактивного режима работы с собранными данными. Пользователь может выводить на дисплей картину каждой из полученных областей.

Метрологическое и сервисное оборудование позволяет имитировать воздействия на преобразователь электромагнитных полей дефектов и анализировать отклик функциональных узлов дефектоскопа на соответствие заданной функции преобразования. При этом делается вывод о работоспособности всей системы и каждого узла в отдельности. При необходимости осуществляется коррекция коэффициентов преобразования функциональных узлов.

Основные технические характеристики дефектоскопов-снарядов "Код-2М" и дефектоскопов серии Linalog приведены в табл. 9.1.

Дефектоскопы серии Linalog осуществляют контроль коррозии, эрозионного износа и трещин по одному параметру дефекта – глубине в процентном отношении к толщине стенки, в аналоговой форме в первых моделях и цифровой – в последних. Дефектоскоп комплекса "Код-М" позволяет анализировать дефекты типа коррозии и эрозии по глубине, протяженности и ширине в лабораторных условиях с использованием аппаратуры для анализа изображений. Дефектоскоп комплекса "Код-2М" такой анализ осуществляет автоматически на борту и в цифровом коде.

9.1. Основные технические характеристики дефектоскопов снарядов

Характеристика	Linalog 1420 (фирма AMF Tuboscope, США)	"Код-2М"
Параметры объекта контроля	Газопроводы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7 ... 25 мм и изгибом траектории радиусом не менее $3D$	Газопроводы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7 ... 25 мм и изгибом траектории радиусом не менее $5D$
Порог чувствительности	Каверны глубиной 0,3Т и 0,2Т на внешней и внутренней поверхности трубопровода соответственно	Коррозионные каверны глубиной 0,3Т и 0,2Т на внешней и внутренней поверхности трубопровода соответственно и протяженностью 0,7Т. Эрозионный износ глубиной 0,2Т и протяженностью Т. Поперечная трещина глубиной 0,35Т и 0,4Т на внутренней и внешней поверхности трубопровода соответственно, шириной 0,1 мм и протяженностью 100 мм
Диапазоны и погрешность измерения	Глубина: $(0,2 \dots 1,0)T \pm \pm 0,15T$	Глубина: $(0,2 \dots 1,0)T \pm 0,15T$, протяженность: от $(0,70 \pm 0,35)T$
Конструктивные особенности	Трехсекционный дефектоскоп-снаряд с размещением на борту аппаратуры обработки в аналоговой и цифровой форме, энерго-независимого накопителя информации и источника питания	Двухсекционный дефектоскоп-снаряд с размещением источника питания (в первой секции), системы обнаружения дефектов (во второй секции), аппаратуры обработки информации в аналоговой и цифровой форме, энерго-независимого накопителя информации
Наличие сервисной аппаратуры	Диагностический блок для приведения дефектоскопа в рабочий режим перед запуском, передачи данных из памяти снаряда в считывающее устройство (для анализа), ввода данных в процессе проверки электронного блока снаряда; считывающее печатающее устройство (персональная ЭВМ)	Система для обработки накопленных в дефектоскопе данных, проверки технического состояния и тестирования дефектоскопа перед пуском, имитации рабочих режимов контроля трубопровода, вывода на дисплей выявленных опасных областей трубопровода и их углубленного анализа

Условные обозначения: D – диаметр трубопровода; T – толщина стенки трубопровода.

Дефектоскоп-снаряд "Код-4М-1420", являясь значительным достижением в области создания средств внутритрубной диагностики газопроводов, наиболее полно отвечает требованиям обеспечения безопасности газотранспортных систем. Указанное устройство выявляет дефекты типа продольной трещины, группы продольных трещин, находящихся во взаимодействии, коррозионные поражения (обширные и локальные), а также дефекты, образующиеся в процессе производства труб (наклеп и остаточная деформация при вдавливании технологических роликов), дефекты листового проката – исходного материала труб (закаты, отслоившиеся пленки).

Наиболее опасны для стенок газопровода дефекты внешней поверхности типа продольных трещин и групп трещин, находящихся во взаимодействии, – так называемые стресс-коррозионные дефекты. Распространение таких дефектов на газопроводах, находящихся в эксплуатации около 20 лет в северных регионах, вызывает необходимость создания и ввода в эксплуатацию дефектоскопов внутритрубного контроля высокого разрешения, способных выявлять эти дефекты.

Высокое разрешение дефектоскопа-снаряда "Код-4М-1420" достигается благодаря высокому уровню магнитной индукции стенки трубы (1,6 Тл), высокой частоте измерения поля в продольном и поперечном направлениях, обеспечиваемой 512 каналами локальных магниточувствительных элементов Холла, опрашиваемых с частотой, соизмеримой со скоростью движения измерительной системы в газовом потоке, обеспечению минимально возможной высоты измерения поля над поверхностью.

Значительное повышение разрешения этого дефектоскопа обеспечивает метод обработки информации, позволяющий на

основе исследования рельефа магнитного поля, его коррекции по обучаемым моделям дефектов выполнять расчет параметров дефектов. В дефектоскопе использован метод выявления дефектов в приложенном поперечном магнитном поле, создаваемом локальными системами намагничивания участка трубопровода двухполюсными источниками постоянного магнитного поля на основе высокоэнергетических магнитов неодим–железо–бор. Источники поля максимально приближены к поверхности трубы, магнитное сопротивление воздушного зазора минимизировано.

Взаимное расположение локальных источников и направление создаваемых полей выбраны исходя из условия минимизации полей рассеивания полюсов и концентрации поля на контролируемых участках в зоне расположения преобразователей. В процессе контроля система намагничивания и измерения отслеживает внутренний контур трубопровода, имеет возможность огибать локальные неоднородности поверхности, преодолевать без разрушения сужения внутреннего сечения до $0,85D$ (D – диаметр трубопровода) и участки с изгибом строительной оси радиусом $3D$. Контроль осуществляется в газовом потоке со скоростью 4 ... 5 м/с.

Дефектоскопом выявляются любые дефекты внешней и внутренней поверхности труб, при этом минимальные дефекты типа поверхностных трещин имеют глубину $0,2T$ и протяженность $2T$, минимальные дефекты типа коррозионных каверн имеют глубину $0,15T$ и диаметр $(0,5 \dots 1,0)T$, минимальная общая коррозия имеет глубину $0,2T$.

Габаритные размеры дефектоскопа – 2,4 м и масса – 2,2 т являются минимальными среди аналогичных параметров известных дефектоскопов-снарядов для внутритрубного контроля действующих газопроводов.

9.2. ОБЪЕМНО-ШОВНЫЙ ДЕФЕКТΟΣКОП ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

Объемно-шовный дефектоскоп обеспечивает возможность магнитной дефектоскопии тела трубы по всему сечению, включая сварной шов и околошовную зону. Конструктивно дефектоскоп представляет собой две самостоятельные системы, одна из которых служит для магнитной дефектоскопии верхней половины трубы, а вторая – нижней. Различием в выполняемых функциях обуславливается различие в конструкции механических частей этих систем. Однако их электронные части идентичны. В их основе – интеллектуальные сенсоры с многоэлементными преобразователями магнитного поля, которые объединены во взаимозаменяемые электронные блоки. Каждый из них представляет собой самостоятельно функционирующий 16-элементный магниточувствительный блок, магнитные элементы которого находятся в двух защитных твердосплавных лыжах, скользящих по поверхности трубы и охватывающих зону по 8 ... 10 мм каждая, благодаря чему возможен

контроль криволинейных поверхностей. Поскольку неразрушающему контролю подвергаются трубы диаметром от 20 до 152 мм, механическая часть обеспечивает быструю (в течение 2 ч) перенастройку системы при переходе от одного диаметра к другому. Это достигается применением блочного принципа электроники.

В зависимости от диаметра контролируемых труб в работе участвуют от 6 до 24 электронных блоков, информация с которых поступает на единый пульт и от туда – на исполнительные устройства (сортирующее устройство и др.), а также на дефектоотметчик и видеоконтрольные устройства. Одновременно сигнал о дефекте поступает на пульт сварщика, обслуживающего трубоэлектросварочный агрегат, который оперативно изменяет режим сварки для получения качественного шва.

Магнитные элементы, образующие интеллектуальный преобразователь, изготовлены по интегральной технологии, их размеры чрезвычайно малы, и они расположены достаточно близко к поверхности сварного шва, поэтому дефектоскоп позволяет выявлять такие тонкие дефекты, как слипания, и уверенно фиксировать протяженные дефекты типа трещин, не-

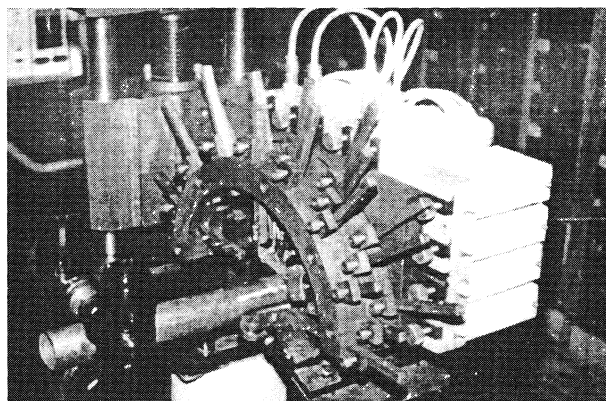


Рис. 9.1. Измерительная позиция объемно-шовного дефектоскопа для НК всего тела электросварных труб, включая сварной шов и околошовную зону

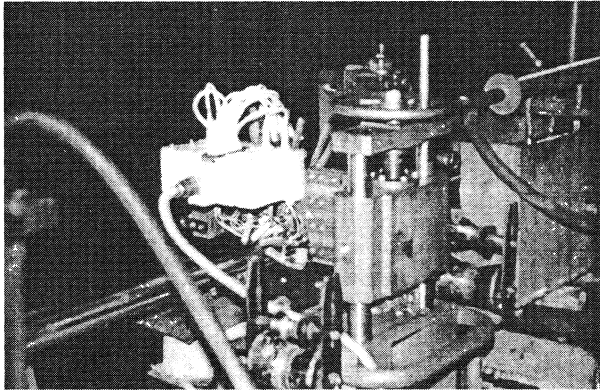


Рис. 9.2. Рабочее положение объемно-шовного дефектоскопа в технологическом потоке производства прямошовных труб диаметром 10 ... 60 мм

сквозных непроваров, смещений кромок и утонений шва высотой более 10 % толщины стенки трубы, а также протяженные дефекты основного металла высотой более 4 % и длиной более 6,3 мм и объемные дефекты в сварном соединении и основном металле, сравнимые со сверлениями диаметром 0,79 мм. Так как намагничивание трубы проводится под углом к оси трубы и многоэлементные преобразователи расположены к ней под определенным углом, одновременно с продольными трещинами можно обнаружить поперечные или различно ориентированные дефекты по всему сечению трубы, в том числе в кольцевом стыковом шве.

На рис. 9.1 показана измерительная позиция такого объемно-шовного дефектоскопа (для контроля верхней половины трубы), а на рис. 9.2 дано расположение ее в технологическом потоке трубоэлектросварочного агрегата (ТЭСА) для производства газопроводных труб диаметром 10 ... 60 мм.

Чувствительность дефектоскопа соответствует наивысшим уровням чувствительности по стандартам ASTM, API и DIN, а надежность достаточна для использования в цеховых условиях.

Ниже приведены основные технические характеристики установок объемно-шовной дефектоскопии электросварных труб:

Диаметр контролируемых прямошовных электросварных труб, мм	20 ... 219
Толщина стенки труб, мм	1 ... 10
Ширина зоны контроля, мм	8, 16, 32, ..., 480
Скорость движения трубы в зоне контроля, м/с	0,1 ... 2
Температура сварного шва в зоне контроля, °С	До 150
Температура окружающей среды, °С	5 ... 50
Масса механической части, кг	500
Масса электрической части, кг	50
Питание от сети переменного тока:	
напряжение, В	220(380) и 36
частота, Гц	50
мощность, В · А	Менее 1000

9.3. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ

Создан ряд магнитных дефектоскопов для неразрушающего контроля сварных изделий из ферромагнитных материалов, полученных методом высокочастотной, электродуговой и лазерной сварки, сварки трением, – прямошовных и спирально-шовных нефтегазопроводных электросварных труб, нефтяных бурильных труб с приварными муфтозамковыми соединениями, а также сварных швов плоскостных конструкций или конструкций с небольшой кривизной контролируемой поверхности. В этих дефектоскопах для регистрации топографии магнитного поля поперечное перемещение преобразователя относительно дефекта не требуется. Взамен этого применяется многоэлементный преобразователь на переходных процессах. Преобразователь содержит миниатюрные МЭ, расположенные на расстоянии 1 мм друг от друга вдоль линии или нескольких линий.

Применение многоэлементного преобразователя, который по существу является электронной системой сканирования зоны контроля, обеспечивает дискретное считывание топографии магнитного поля с шагом 1 мм как в продольном, так и в поперечном направлении при скорости контроля 2 м/с, что вполне достаточно в отношении требуемой плотности сканирования.

Контроль осуществляется следующим образом. Труба с выхода ТЭСА непрерывным потоком поступает в зону контроля, где одновременно происходят ее намагничивание с помощью электромагнита и электронное сканирование шва многоэлементным преобразователем. Информация о качестве шва, т.е. о наличии нарушений сплошности, извлекается в результате соответствующей обработки сигнала преобразователя с помощью элек-

тронных устройств и поступает на дефектоотметчик, который в случае обнаружения дефекта делает соответствующую отметку места дефекта. Одновременно сигнал о дефекте поступает на пульт сварщика (оператора), который оперативно изменяет режим сварки для получения качественного шва. Забракованные дефектоскопом трубы проходят все технологические операции, затем поступают на гидропресс и столы ОТК. Годные трубы гидропрессованию не подвергаются.

Дефектоскоп встраивается непосредственно в линию ТЭСА на расстоянии 5 ... 10 м от узла сварки, поэтому температура шва достаточно высокая и может достигать 100 ... 150 °С. При таких температурах магнитный контроль приемлем, а в конструкции дефектоскопа предусмотрено охлаждение преобразователя технической водой.

Для контроля прямошовных электросварных труб дефектоскоп имеет электромагнит П-образной формы. Дефектоскоп снабжен набором полюсных наконечников для каждого диаметра труб. Преобразователь (16-элементный) помещен в специальный корпус, в котором размещены также коммутирующие элементы. Этот преобразователь устанавливается на специальную подставку, которая скользит по поверхности сварного шва со снятым наружным гратом. Имеется предохранительная планка толщиной 0,5 мм для защиты поверхности преобразователя от механических ударов и попадания посторонних предметов, пыли, грязи и т.п.

Каждая установка кроме электронного блока включает механическую систему ввода и вывода электромагнита и преобразователя в технологический поток, которая позволяет после настройки дефектоскопа на стандартном образце установить их непосредственно над сварным швом. Установка работает в полностью автоматическом режиме, обеспечивая технологический и сдаточный контроль.

В установке для контроля качества нефтепроводных спирально-шовных электросварных труб диаметром до 600 мм использованы многоэлементные преобразователи на переходных процессах. Намагничивание трубы осуществляется с помощью соленоида, который запитывается постоянным током силой 12 ... 20 А (в зависимости от диаметра контролируемых труб). Преобразователь помещен в защитный корпус, который с небольшим усилием прижат с помощью специального приспособления к поверхности сварного шва, благодаря чему обеспечивается постоянство зазора между преобразователем и трубой. На днище этого корпуса размещены твердосплавные пластины, защищающие измерительную часть от механических повреждений и изнашивания. Имеется система аварийного подъема преобразователя над поверхностью трубы в случае появления неснятого грата или участков трубы, где была применена ручная сварка. Скорость контроля составляет около 0,6 м/с.

Технология контроля качества сварных соединений спирально-шовных труб аналогична технологии контроля прямошовных труб. С помощью установок магнитной дефектоскопии (УМД) для прямошовных и спирально-шовных труб уверенно выявляются искусственные дефекты типа сверлений в сварном шве диаметром 1,6 мм (при хорошем качестве поверхности трубы – отверстия диаметром 0,79 мм), а также поверхностные и внутренние дефекты типа прямоугольной канавки глубиной 10 % толщины стенки независимо от глубины залегания (до 10 мм) и диаметра контролируемых труб.

В результате металлографических исследований на образцах, забракованных в процессе промышленной эксплуатации УМД, установлено, что они позволяют обнаруживать практически все дефекты,

характерные для высокочастотной сварки, – 10 %-ные трещины, слипания, непровары, прожоги, смещение кромок и утонение шва более 15 % толщины стенки трубы, а также дефекты основного металла в околошовной зоне высотой более 4 %.

В установках предусмотрена автоматическая система слежения за отклонением шва в пределах $\pm 30^\circ$ от вертикали, проходящей через ось трубы, а также механическая система обеспечения постоянства зазора между преобразователями и изделием.

В УМД применена механическая система, позволяющая легко вводить и выводить измерительную позицию из технологического потока для настройки и калибровки дефектоскопа на стандартном образце (стандарты ASTM требуют производить операцию калибровки каждые 4 ч или перед началом и после окончания работы).

Поскольку размеры МЭ многоэлементного преобразователя чрезвычайно малы (0,1 ... 0,3 мм) и они расположены достаточно близко к поверхности сварного шва, эти установки позволяют выявлять такие тонкие дефекты, как слипания, и, в отличие от вихретоковых дефектоскопов, уверенно фиксируют протяженные дефекты типа смещений кромок и утонений.

Информация о качестве шва с дискретностью 1 мм может быть выведена на видеоконтрольное устройство, расположенное вблизи пульта сварщика, что позволяет ему отслеживать ухудшение качества шва еще до появления макродефектов (устанавливать наличие микротрещин, связанное с отклонениями режимов сварки, плохое снятие наружного грата и т.п.) и своевременно корректировать режим сварки до получения качественного шва (обратная связь). Чувствительность УМД соответствует стандартам ASTM, API, DIN.

Сопоставление результатов магнитного контроля с результатами рентгенотелевизионного контроля показало, что при одинаковой чувствительности к объемным дефектам рентгенотелевизионный метод уступает магнитному по выявлению линейных дефектов (узкие трещины, подрезы и т.п.), а также по производительности

контроля. Кроме того, рентгенотелевизионный метод требует обязательного присутствия оператора, в то время как магнитный метод может быть полностью автоматизирован.

Основные технические характеристики установок магнитной дефектоскопии приведены ниже:

Диаметр контролируемых электросварных труб, мм:

прямошовных	20 ... 219
спирально-шовных	20 ... 600
Толщина стенки труб, мм	1 ... 10
Ширина зоны контроля, мм	8, 16, 32, 64
Скорость движения трубы в зоне контроля, м/с	0,1 ... 2
Температура сварного шва в зоне контроля, °С	До 150
Температура окружающей среды, °С	5 ... 50
Масса механической части, кг	250
Масса электрической части, кг	50
Питание от сети переменного тока:	
напряжение, В	220(380) и 36
частота, Гц	50
мощность, В · А	Менее 1000

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

В практике неразрушающего контроля ферромагнитных материалов широкое применение находят магнитные методы, основанные на намагничивании переменным полем и считывании тангенциальной или нормальной составляющих магнитного поля рассеяния, обусловленных дефектом. При дефектоскопии деталей с контролируемой поверхностью сложного профиля, таких как поверхность зуба, резьба, галтельные (радиусные) переходы, топография магнитного поля становится настолько сложной, что регистрация по одной из составляющих с отстройкой от первичного поля (как это делается, например, при феррозондовом контроле), практически не дает положительного эффекта.

При дефектоскопии деталей с переменным сечением конфигурация магнитного поля рассеяния также становится сложной. Начальный уровень нормальной составляющей довольно значителен и зависит от изменений профиля зуба, особенно при контроле сгона резьбы, в самых вероятных местах образования усталостных трещин или галтельных (радиусных) переходах.

10.1. ПОПЕРЕЧНАЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для дефектоскопии поверхностей сложного профиля предложен метод, основанный на регистрации поперечной тангенциальной составляющей магнитного поля дефекта при локальном намагничивании контролируемого участка зуба, витка резьбы.

Сущность предложенного метода заключается в следующем. Локальное намагничивание осуществляется под неко-

торым углом к плоскости предполагаемого дефекта, а с помощью преобразователя для магнитного поля измеряется поперечная тангенциальная составляющая, обусловленная только дефектом. Намагничивание осуществляется либо током, подводимым с помощью двух электродов к смежным граням одной нитки резьбы, либо с помощью электромагнита переменного тока (при контроле деталей со слоем окислы или другим немагнитным покрытием).

Если рассмотреть плоскую задачу, когда намагничивание осуществляется равномерным магнитным полем (либо равномерным приложенным током), на поверхности имеем только одну составляющую магнитного поля – продольную тангенциальную, совпадающую по направлению с основным приложенным полем. Если имеется дефект, ось которого расположена под некоторым углом к направлению приложенного поля, то магнитное поле в районе дефекта деформируется. При этом тангенциальную составляющую магнитного поля дефекта можно представить как продольную, совпадающую по направлению с приложенным намагничивающим полем, и как поперечную, ортогональную к этому приложенному полю. В резьбе картина магнитного поля значительно сложнее, но существо вопроса остается прежним.

Рассмотрим случай, когда вектор напряженности равномерного магнитного поля H_1 составляет некоторый угол α с границей раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 (рис. 10.1). При переходе через границу раздела вектор H_1 преломляется в зависимости от соотношения μ_1 и μ_2 , изменяет свое направление (на рисунке показан случай, когда $\mu_1 > \mu_2$).

При этом появляется поперечная тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_y , перпендикулярная к вектору напряженности приложенного магнитного поля H_1 . Вычисление этой составляющей выполним с учетом следующих граничных условий:

1) равенство нормальных составляющих вектора магнитной индукции

$$B_{1n} = B_{2n}$$

или

$$\mu_0 \mu_1 H_{1n} = \mu_0 \mu_2 H_{2n}; \quad (10.1)$$

$$\mu_1 H_1 \sin \alpha_1 = \mu_2 H_2 \sin \alpha_2;$$

2) непрерывность тангенциальной составляющей вектора напряженности магнитного поля на границе раздела:

$$H_{1t} = H_{2t}; \quad \frac{B_{1t}}{\mu_0 \mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_0 \mu_2}. \quad (10.2)$$

С учетом выражений (10.1) и (10.2) находят преломление вектора H_1 на границе двух сред.

Приняв во внимание обозначения на рис. 10.1, а также равенство

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \mu_1 = \operatorname{tg} \alpha_2 \mu_2, \quad (10.3)$$

где $\operatorname{tg} \alpha_1 = H_{1n} / H_{1t}$, $\operatorname{tg} \alpha_2 = H_{2n} / H_{2t}$, поперечную составляющую H_y можно выразить следующим образом:

$$H_y = H_2 \sin \Delta \alpha = H_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1). \quad (10.4)$$

Подставив значения α из равенства (10.3) и H_2 из выражения (10.1) в последнее выражение, найдем

$$H_y = H_1 \frac{\mu_1}{\mu_2} \sin \alpha \frac{\sin \left[\arctg \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \operatorname{tg} \alpha_1 \right) - \alpha_1 \right]}{\sin \left[\arctg \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \right]}. \quad (10.5)$$

После несложных преобразований окончательно получим

$$H_y = \frac{H_1}{2} \left(\frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \right) \sin(2\alpha). \quad (10.6)$$

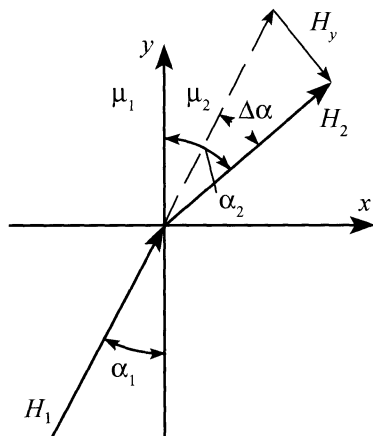


Рис. 10.1. Преломление вектора напряженности поля на границе раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2

Поперечная тангенциальная составляющая H_y , как следует из выражения (10.6), изменяется по закону двойного угла, образованного между вектором напряженности магнитного поля и границей раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 ; H_y достигает максимального значения при $\alpha = 45^\circ$ и тождественно обращается в ноль при $\alpha = 0$ и 90° .

На границе раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 возник-

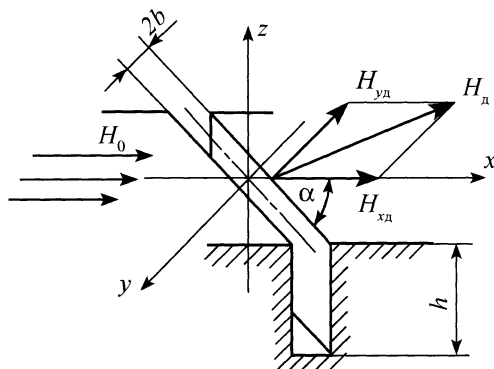


Рис. 10.2. Расположение оси дефекта под углом α относительно вектора напряженности намагничивающего поля H_0

кают поверхностные магнитные "фиктивные" заряды, плотность σ_0 которых выражается следующей зависимостью:

$$H_{2n} - H_{1n} = 4\pi\sigma_0. \quad (10.7)$$

С учетом $B_{2n} - B_{1n}$ или $H_{1n}\mu_1 - H_{2n}\mu_2$

$$H_{1n} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} - 1 \right) = 4\pi\sigma_0. \quad (10.8)$$

Выразив H_1 в формуле (10.6) через σ_0 , получим

$$H_y = 4\pi\sigma_0 \cos\alpha. \quad (10.9)$$

Тогда с учетом, что для воздуха $\mu_2 = 1$,

$$H_y = M_n \cos\alpha, \quad (10.10)$$

где $M_n = H_n(\mu_1 - 1) = H_1(\mu_1 - 1) \sin\alpha$ — намагниченность среды с магнитной проницаемостью μ_1 на границе раздела с воздухом ($\mu_2 = 1$). При этом выражение (10.8) преобразуется к виду

$$H_{1n}(\mu_1 - 1) = 4\pi\sigma_0 = M_n. \quad (10.11)$$

Поперечная тангенциальная составляющая магнитного поля возникает на границе раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 :

$$H_y = 4\pi\sigma_0 \cos\alpha = \frac{H_1}{2}(\mu_1 - 1) \sin(2\alpha). \quad (10.12)$$

Для бесконечно глубокого дефекта ($h \rightarrow \infty$) граница раздела между μ_1 и μ_2 представляется как двойной слой поверхностных магнитных зарядов. Тогда на поверхности раздела

$$H_{y/(h \rightarrow \infty)} = 2H_y = 8\pi\sigma_0 \cos\alpha = H_1(\mu_1 - 1) \sin(2\alpha). \quad (10.13)$$

Рассмотрим бесконечно протяженный дефект глубиной h с раскрытием $2b$. Пусть дефект типа бесконечно протяженной прямоугольной трещины, плоскость которой перпендикулярна к поверхности изделия, расположен под углом α к основному намагничивающему полю \mathbf{H}_0 , на-

правленному вдоль оси x (рис. 10.2). Приложенное поле \mathbf{H}_0 можно представить геометрической суммой двух полей \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 , из которых одно перпендикулярно к направлению оси трещины, а другое совпадает с ним. В формировании магнитного поля дефекта типа прорези, у которой протяженность много больше ее раскрытия, участвует только последняя составляющая. Полагая, что поле дефекта пропорционально намагничивающему приложенному полю, т.е. принимая магнитную проницаемость исследуемого материала не зависящей от напряженности приложенного поля ($\mu_1 = \text{const}$), можно выразить составляющую магнитного поля дефекта в функции угла α , под которым расположена ось этого дефекта к направлению приложенного поля:

$$H_d = H_{d0} \sin\alpha, \quad (10.14)$$

где H_d — напряженность магнитного поля дефекта при $\alpha = 90^\circ$ (т.е. тот случай, когда поле перпендикулярно к плоскости дефекта).

Теперь рассмотрим тангенциальную составляющую магнитного поля дефекта H_d . Как следует из рис. 10.3, ее можно разложить на две: продольную H_{xd} , совпадающую с направлением приложенного поля, и поперечную H_{yd} , направленную ортогонально к этому полю.

После несложных преобразований, используя выражение (10.14) и обозначения, принятые на рис. 10.2, получим

$$H_{yd} = H_d \cos\alpha = \frac{H_{d0}}{2} \sin(2\alpha); \quad (10.15)$$

$$H_{xd} = H_d \sin\alpha = \frac{H_{d0}}{2} [1 - \cos(2\alpha)]. \quad (10.16)$$

Анализ выражения (10.15) показывает, что составляющая H_{yd} симметрична относительно угла $\alpha = \pi/4$, а при $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ она обращается в нуль. При $\alpha = 45^\circ$ достигается максимальное значение H_{yd} , в то время как H_{xd} при изменении α от 90° до нуля монотонно уменьшается. Состав-

ляющая $H_{хд}$ симметрична относительно угла $\alpha = \pi/2$, при котором она принимает максимальное значение, в то время как $H_{вд}$ при этом обращается в нуль (см. рис. 10.3). Максимальные значения $H_{хд}$ в 2 раза превышает максимальные значения $H_{вд}$, а при $\alpha = 45^\circ$ значения $H_{хд}$ и $H_{вд}$ совпадают.

Определим тангенциальные составляющие магнитного поля для дефекта типа прямоугольной прорези, расположенного под углом α .

С учетом выражения

$$H_{д} = 2\sigma_0 \left[\arctg \frac{h(x \cos \alpha + b)}{(x \cos \alpha + b) + z(z+h)} - \arctg \frac{h(x \cos \alpha + b)}{(x \cos \alpha - b) + z(z+h)} \right] \sin \alpha \quad (10.17)$$

получим

$$H_{вд} = \sigma_0 F(x, z, h, 2b) \sin(2\alpha); \quad (10.18)$$

$$H_{хд} = \sigma_0 F(x, z, h, 2b) [1 - \cos(2\alpha)], \quad (10.19)$$

где

$$F(x, z, h, 2b) = \left[\arctg \frac{h(x \cos \alpha + b)}{(x \cos \alpha + b)^2 + z(z+h)} - \arctg \frac{h(x \cos \alpha - b)}{(x \cos \alpha - b)^2 + z(z+h)} \right] -$$

функция, отображающая топографию магнитного поля дефекта в зависимости от его размеров ($h, 2b$) и координат (x, z).

Нормальная $H_{зд}$ составляющая с учетом выражения (10.17) принимает следующий вид:

$$H_{зд} = \sigma_0 \sin \alpha \ln \frac{[(x \cos \alpha + b)^2 + (z+h)^2]}{[(x \cos \alpha + b)^2 + z^2]} \times \frac{[(x \cos \alpha - b)^2 + z^2]}{[(x \cos \alpha - b)^2 + (z+h)^2]}. \quad (10.20)$$

Измерения по поперечной тангенциальной составляющей магнитного поля дефекта позволяют значительно повысить

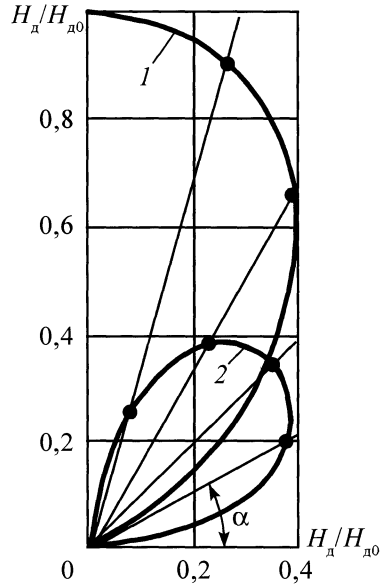


Рис. 10.3. Зависимости тангенциальных составляющих магнитного поля дефекта $H_{хд}$ (1) и $H_{вд}$ (2) от угла α

соотношение сигнал/фон. Уровень начального фона определяется конструктивным исполнением и правильной ориентацией преобразователя поля (ферроэлемент, индукционная катушка) перпендикулярно к приложенному намагничивающему полю в случае отсутствия дефекта.

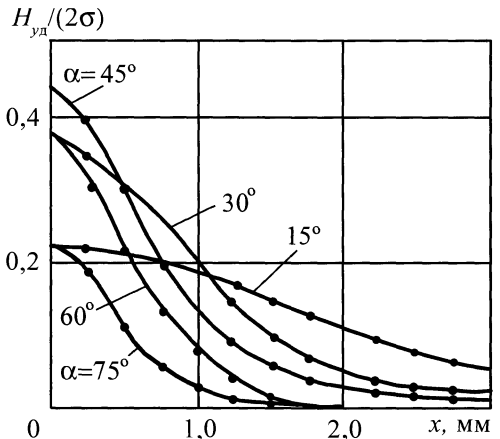


Рис. 10.4. Изменение составляющей $H_{вд}$ при разных значениях α для прорези ($z = 0,5$ мм, $h = 8$ мм, $2b = 0,5$ мм)

При таком способе измерений появляется возможность использования одиночного элемента взамен дифференциальных. Отпадает необходимость проведения трудоемкой работы, связанной с тщательным подбором сердечников индикаторов поля, балансировкой, намоткой и т.п.

При измерении по тангенциальной составляющей при рассмотрении *двухмерной* картины магнитного поля (намагничивание перпендикулярно к оси дефекта) производится регистрация суммарного поля рассеяния:

$$\mathbf{H}_{\Sigma} = \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_\Phi, \quad (10.21)$$

где \mathbf{H}_d – поле рассеяния от дефекта; \mathbf{H}_Φ – поле рассеяния, обусловленное первичным приложенным полем \mathbf{H}_0 .

При намагничивании, например, приставными магнитами деталей сложного профиля (резьба, галтельный переход) задача усложняется из-за значительного увеличения поля рассеяния первичного поля \mathbf{H}_0 , обусловленного спецификой контролируемого профиля, особенно при изменении зазора между полюсами электромагнита и контролируемой поверхностью. В связи с этим способ регистрации поля дефектов по тангенциальной составляющей не нашел широкого применения. Использование дифференциальных схем вызывает дополнительные трудности, связанные с компенсацией изменения зазора, подстройкой и т.п. При измерении по поперечной составляющей все эти недостатки устраняются, так как поле рассеяния, обусловленное первичным намагничивающим полем, отсутствует, а регистрируется только составляющая \mathbf{H}_d магнитного поля дефекта, поэтому

$$\mathbf{H}_{\Sigma} = \mathbf{H}_d. \quad (10.22)$$

Анализ выражений (10.15) и (10.16) показывает, что с уменьшением угла α поле над дефектом становится все более размытым, однако максимальные значения $H_{хд}$ и $H_{уд}$ соответствуют истинному

раскрытию $2b$, т.е. при расположении плоскости дефекта под некоторым углом к намагничивающему полю наблюдается как бы увеличение раскрытия дефекта. Величину этого эффективного раскрытия можно выразить через угол α следующим образом:

$$2b_{\Phi} = 2b / \cos \alpha. \quad (10.23)$$

Рис. 10.4 отражает топографию составляющей магнитного поля дефекта в виде прорези ($z = 0,5$ мм, $h = 8$ мм, $2b = 0,5$ мм) при разных значениях α . Сравнивая кривые для $\alpha = 60$ и 30° , для которых максимальные значения $H_{уд}$ равны, отмечаем, что топография поля во втором случае более размыта. Этот факт при заданной точности измерений напряженности магнитного поля дефекта позволяет увеличить минимальные размеры преобразователя. Длина измерительной катушки ферроэлемента (при условии, что длина намного превышает диаметр сечения) при расположении плоскости дефекта под углом $\alpha = 30^\circ$ к намагничивающему полю может быть в 1,88 больше, чем при $\alpha = 60^\circ$, а при $\alpha = 15^\circ$ – уже в 3,7 раза больше по сравнению с $\alpha = 75^\circ$. Расчеты проведены по следующей формуле:

$$\mathbf{H}_{уд} = \sigma_0 \frac{1}{l} \int_{-0,5l}^{0,5l} \mathbf{H}_{уд} dx, \quad (10.24)$$

где l – длина измерительной обмотки ферроэлемента.

Этот пример наглядно показывает преимущества рассматриваемого способа обнаружения дефектов. С учетом того, что имеется возможность практически полностью отстроиться от первичного поля \mathbf{H}_0 , зону контроля одним преобразователем можно расширить за счет увеличения рабочего зазора z .

Информацию о поперечной составляющей магнитного поля можно успешно использовать при оценке напряженного состояния, анизотропии, обусловленной изменением магнитной проницаемости. Если имеется приращение магнитной про-

нищаемости μ_1 на $\Delta\mu$ (что наблюдается при изучении усталостных явлений), выражение (10.6) преобразуется к виду

$$H_y = \frac{H_1}{2} \frac{\Delta\mu}{\mu} \sin(2\alpha). \quad (10.25)$$

10.2. ДВУХЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Сущность предлагаемого метода сводится к следующему. Контролируемый участок локально намагничивается полем низкой частоты, а ферроэлемент с пермалловым сердечником, имеющий две обмотки (возбуждающую и измерительную), устанавливается таким образом, чтобы магнитное поле рассеяния, обусловленное намагничивающим током, минимально воздействовало на сердечник ферроэлемента (ось сердечника перпендикулярна к намагничивающему полю). Вследствие этого ЭДС высокой частоты, наводимая в измерительной обмотке ферроэлемента, не модулирована намагничивающим низкочастотным полем; при наличии дефекта, расположенного под углом α (кроме $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$) к основному намагничивающему полю, низкочастотное поле деформируется. В результате появляется составляющая, направленная вдоль оси ферроэлемента. На измерительной обмотке наводится ЭДС высших гармоник высокой частоты, в том числе и вторая, промодулированная частотой намагничивающего поля, причем модуляция происходит как по основной частоте низкочастотного поля, так и по ее гармоникам. По глубине модуляции можно судить о наличии дефектов, для чего проводится детектирование сигнала по высокой частоте. Таким образом, в измерительной схеме предусмотрено двойное преобразование частоты измеряемого поля, заключающееся в модуляции низкочастотным измеряемым

полем высокочастотного, а затем детектировании и выделении низкочастотной составляющей Ω или ее гармоник $n\Omega$.

Используя двухчастотный способ обработки информации, можно получить высокую чувствительность.

Помимо высокой чувствительности рассматриваемый метод индикации обладает рядом других положительных свойств: измерительная схема помехоустойчива и не подвержена наводкам от низкочастотных цепей вследствие того, что модуляция осуществляется в самом сердечнике; общее усилие распределяется между высокочастотным и низкочастотными трактами, не создающими взаимных помех.

Нижний порог чувствительности этого метода определяется в основном магнитными шумами сердечника, которые вызываются неповторяемостью кривой намагничивания при циклическом перемагничивании. В каждом периоде намагничивания отдельных доменов происходит при значениях напряженности возбуждающего поля H_b , отличающихся друг от друга на малую случайную величину ΔH_b . Поскольку распределение величины ΔH_b подчиняется статистическим законам, на выходе ферроэлемента помимо дискретного спектра гармоник возбуждающего поля появляется спектр, составляющие которого в полосе пропускания измерительного устройства вызывают хаотические изменения показаний отсчетного прибора.

Важными вопросами двухчастотного способа обработки информации являются: оптимальный выбор режимов возбуждения; исследование спектра ЭДС, наводимой в результате модуляции высокочастотного сигнала слабым низкочастотным; обоснованный выбор той или иной гармонической составляющей, несущей информацию о дефекте; выбор оптимальных размеров ферроэлемента.

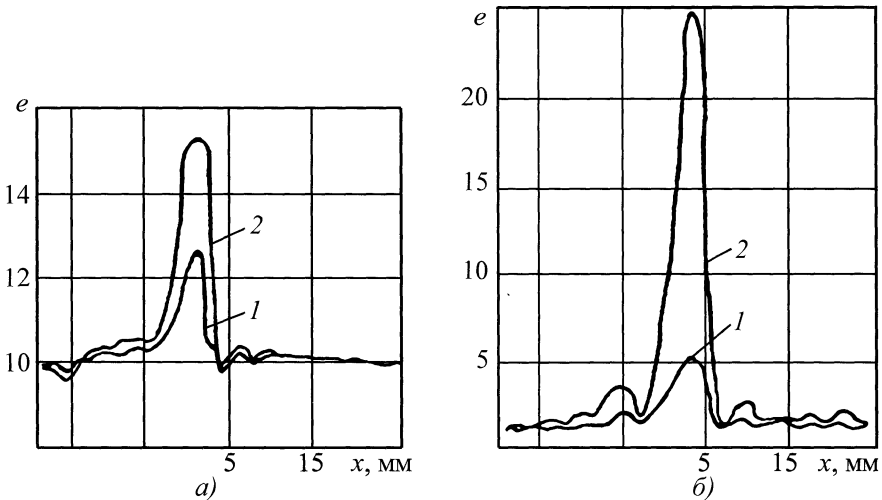


Рис. 10.5. Относительное приращение ЭДС над дефектом для преобразователя с линейной (1) и квадратичной (2) амплитудными характеристиками

Измерение амплитуды второй гармоники огибающей при модуляции низкочастотным полем второй гармоники высокочастотной составляющей ЭДС позволяет получить квадратичную характеристику преобразования. Применяя первичный преобразователь с такой характеристикой для целей дефектоскопии, можно повысить не только помехоустойчивость и соотношение сигнал/помеха, но и разрешающую способность и чувствительность метода.

На рис. 10.5 показаны относительные приращения ЭДС, измеренной феррозлементом с отключенной возбуждающей обмоткой: в режиме индукционной катушки – кривая 1 и в двухчастотном режиме работы – кривая 2.

Результаты измерений по продольной и поперечной тангенциальным составляющим магнитного поля дефекта представлены соответственно на рис. 10.5, а и б. Локаль-

ное намагничивание осуществлялось с помощью электромагнита П-образной формы переменного тока частотой 70 Гц, между полюсами которого помещен феррозлемент.

На рис. 10.6. приведена зависимость $U_{r\Omega}$ от величины измеряемого поля H_{Ω} при двухчастотном способе.

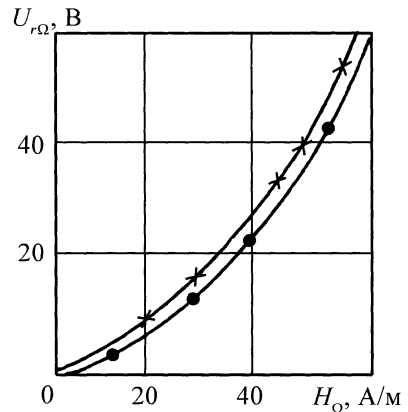


Рис. 10.6. Зависимость напряжения $U_{r\Omega}$ от напряженности измеряемого поля H_{Ω}

10.3. НАМАГНИЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА

Для целей дефектоскопии поверхностей сложного профиля предложено локальное намагничивание контролируемого участка переменным полем частотой Ω , которое создается током, подводимым с помощью двух электродов.

Для объяснения физической сущности метода рассмотрим следующую задачу. Пусть равномерно распределенный ток в проводящей среде с удельной проводимостью σ_1 обтекает дефект конечной протяженности, плоскость которого расположена под углом α к направлению вектора плотности тока (рис. 10.7). Удельную проводимость дефекта обозначим через σ_2 . На границе раздела двух сред линии плотности тока преломляются. Глубину дефекта принимаем бесконечной (подтекание тока под дефект отсутствует). Задачу рассмотрим в общем виде, используя граничные условия преломления линий плотности тока на границе двух сред. Необходимо найти поперечную составляющую вектора плотности тока I_0 в среде с σ_2 , которая перпендикулярна к направлению вектора первичного тока I_1 в случае отсутствия границы двух сред (или в среде с σ_1).

С учетом условий непрерывности вектора нормальной составляющей плотности тока

$$I_{1n} = I_{2n}; I_1 \sin \alpha_1 = I_2 \sin \alpha_2 \quad (10.26)$$

и закона преломления линий плотности тока на границе раздела

$$\frac{i d\alpha_1}{i d\alpha_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (10.27)$$

опустив промежуточные вычисления, получим

$$I_0 = \frac{I_1}{2} \sin(2\alpha) \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right). \quad (10.28)$$

Как следует из этого выражения, составляющая, которая обусловлена наличием границы раздела двух сред с разными проводимостями, расположенной под уг-

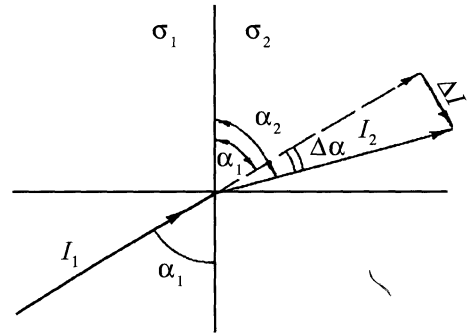


Рис. 10.7. Преломление вектора плотности тока на границе двух сред с проводимостями σ_1 и σ_2

лом α к направлению вектора плотности приложенного тока I_1 , изменяется по закону двойного угла.

Учитывая, что в формировании поперечной тангенциальной $H_{уд}$ составляющей магнитного поля дефекта принимает участие только составляющая I_0 и для дефекта с $\sigma_2 = 0$ можно считать, что

$$H_{уд} \cong k I_0 \cong k I_1 \sin(2\alpha), \quad (10.29)$$

где k – коэффициент пропорциональности, m^{-1} .

При подведении тока к смежным граням, например, одного витка резьбы с помощью двух токовых электродов, расположенных под углом α к образующей резьбы, распределение плотности тока по поверхности значительно сложнее, но это не меняет физической сущности предлагаемого метода намагничивания.

10.4. ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД

Реализация фазочувствительного метода с локальным продольным намагничиванием (дефект в приложенном поле) сводится к следующему.

В контролируемом участке создается локальное электромагнитное поле и регистрируется его изменение, обусловленное протяженным дефектом, с помощью индуктивных первичных преобразователей. Особенностью предлагаемого варианта является регистрация фазы сигнала, полу-

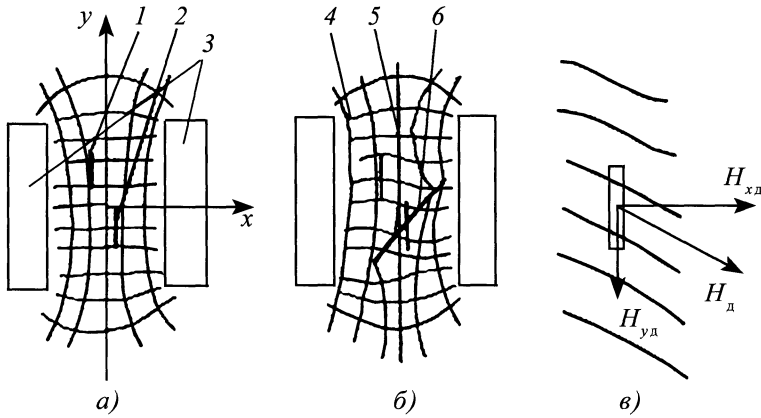


Рис. 10.8. Схема электромагнитного поля преобразователя:

a – без дефекта; *б* – с дефектом; *в* – сумма продольного и поперечного векторов;
 1, 2 – индикаторные катушки; 3 – следы полюсов электромагнита; 4 – линия магнитного поля;
 5 – линия наведенных токов; 6 – дефект

ченного в результате векторного сложения поперечной тангенциальной составляющей поля двух близлежащих участков поверхности.

Локальное намагничивание контролируемого участка поверхности осуществляется П-образным электромагнитом, обмотки которого запитываются током звуковой частоты 1 ... 3 кГц. Ось электромагнита ориентирована к вероятному направлению трещин под углом 30 ... 60°. В области однородного поля межполюсного пространства электромагнита помещаются две индикаторные индуктивные катушки, включенные по дифференциальной схеме. Они реагируют на поперечную тангенциальную составляющую поля, обусловленного дефектом. Такое расположение катушек позволяет значительно уменьшить влияние макронеоднородностей контролируемой поверхности.

На рис. 10.8 показано взаимное расположение индикаторных катушек, полюсов электромагнита, линий результирующего магнитного поля и линий вихревых токов без дефекта и с дефектом. Тангенциальную составляющую H_d можно представить как сумму продольного H_{xd} и поперечного $H_{уд}$ векторов. Индикаторная

катушка 1 в обоих случаях располагается в области невозмущенного поля, а индикаторная катушка 2 при наличии дефекта оказывается в области искривленного поля.

По векторной диаграмме (рис. 10.9) видно, как при этом изменяется фаза результирующей ЭДС, наводимой в индикаторных катушках. На диаграмме введены следующие обозначения: e_1^0, e_2^0, e_Σ^0 – ЭДС индикаторных катушек 1, 2 и результирующая ЭДС без дефекта; e_2, e_Σ – значения ЭДС при наличии дефекта; φ_2, φ – сдвиг фазы ЭДС индикаторной катушки 2 и результирующей ЭДС, вызванный дефектом. Изменение ЭДС и фазы индикаторной катушки 2, обусловленное дефектом, вызывает значительное приращение фазы результирующего сигнала, поэтому носителем информации выбрана фаза φ .

Практическое преимущество рассматриваемого метода заключается в том, что устраняется влияние нерегулярных и импульсных помех, поступающих во входные цепи измерительной схемы. Измерение поперечной тангенциальной составляющей поля позволяет повысить се-

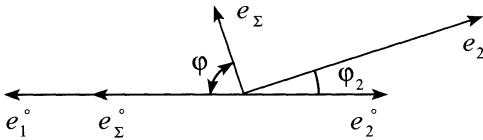


Рис. 10.9. Векторная диаграмма сложения ЭДС индикаторных катушек

лективность контроля к протяженным дефектам типа трещин по отношению к границам локальных неоднородностей, вызванных эрозией и т.п.

На рис. 10.10 показаны кривые изменения фазы φ_{\max} ЭДС индикаторных катушек непосредственно над дефектом от угла α между осью преобразователя и направлением дефекта при постоянном зазоре z между преобразователем и контролируемой поверхностью. Дефект имеет следующие параметры: длина $l = 40$ мм; раскрытие $2b = 0,4$ мм; глубина $h = 3$ мм. Результаты измерений приведены на рис. 10.10 (кривая 1) в полярных координатах (φ_{\max}, α), где φ_{\max} соответствует радиусу-вектору, α – полярному углу, а ось $0x$ – полярной оси. Кривая 2 построена по закону двойного угла. Для наглядности числовой коэффициент перед $\sin(2\alpha)$ выбран равным φ_{\max} , полученному эксперимен-

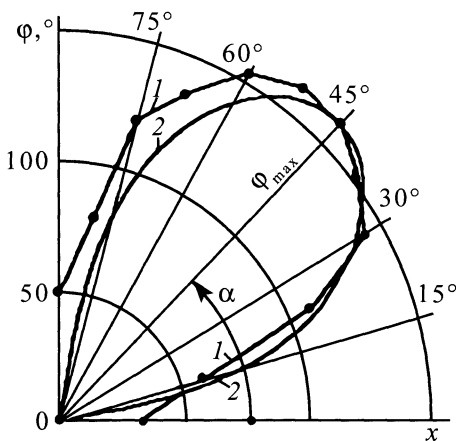


Рис. 10.10. Полярная диаграмма фазы ЭДС индикаторных катушек

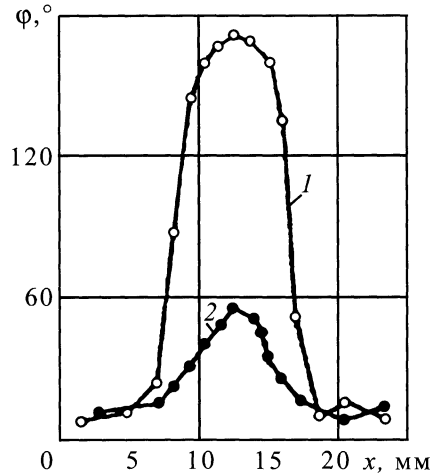


Рис. 10.11. Топография поля над дефектом с параметрами:

$1 - l = 20$ мм, $2b = 0,35$ мм, $h = 2$ мм;
 $2 - l = 20$ мм, $2b = 0,35$ мм, $h = 1$ мм

тально при $\alpha = 45^\circ$, что привело к слиянию кривых 1 и 2 при $\alpha = 45^\circ$. Поэтому если известно вероятное направление оси дефекта, то для повышения чувствительности нужно располагать намагничивающую систему под углом $\alpha = 30 \dots 60^\circ$ к этому направлению.

Топография поля над дефектом с различными параметрами, полученная с помощью рассматриваемого метода дефектоскопии, приведена на рис. 10.11.

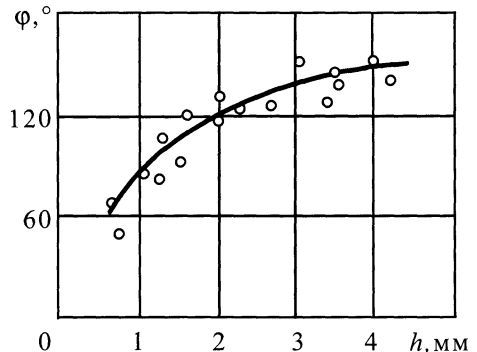


Рис. 10.12. Зависимость фазы φ от глубины дефекта h

Зависимость фазы результирующего сигнала от глубины дефекта при воздушном зазоре $z = 0,5$ мм показана на рис. 10.12. Значительный разброс экспериментальных точек объясняется тем, что дефекты имели разное раскрытие: $2b = 0,2 \dots 0,4$ мм. Зависимость фазы от их глубины нелинейна и аналогична зависимости поля дефекта от его глубины.

10.5. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТЯХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Одним из первых был разработан дефектоскоп типа МД-2, в основу работы которого заложен метод регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов с помощью индукционной катушки. Прибор предназначен для дефектоскопии ферромагнитных резьбовых деталей с шагом 3 и 5 мм. Возможен контроль деталей, покрытых слоем окалины или другого немагнитного продукта толщиной до 0,2 мм.

Намагничивающая система (рис. 10.13) преобразователя прибора выполнена в виде П-образного электромагнита переменного тока и охватывает три нитки контролируемой резьбы. В пространстве между гранями соседних витков помещена индикаторная катушка 4, сердечник 6 которой выполнен в виде дуги. В целях повышения чувствительности индикаторная

катушка помещается в поле зуба таким образом, чтобы влияние на нее поля рассеяния, возникающего в пространстве между полюсами электромагнита, было минимальным.

Преобразователь прибора работает следующим образом. Переменный магнитный поток, создаваемый электромагнитом, замыкается через контролируемый участок резьбы. Вследствие влияния скин-эффекта магнитный поток распространяется по поверхности резьбы, главным образом, в области, находящейся между полюсами электромагнита, огибая поверхность резьбы. Ввиду сложности профиля резьбы в пространстве между гранями соседних витков образуется поле рассеяния, которое, проходя через магнитный сердечник индикаторной катушки, наводит в ней ЭДС.

Если у основания граней соседних витков резьбы имеется дефект (трещина), то магнитное сопротивление этого участка резко возрастает, а ЭДС, наводимая в индикаторной катушке, соответственно увеличивается за счет поля рассеяния, обусловленного дефектом.

Следует отметить, что показания прибора сильно зависят от материала контролируемой детали, равномерности термообработки, механических напряжений, изменения радиуса кривизны.

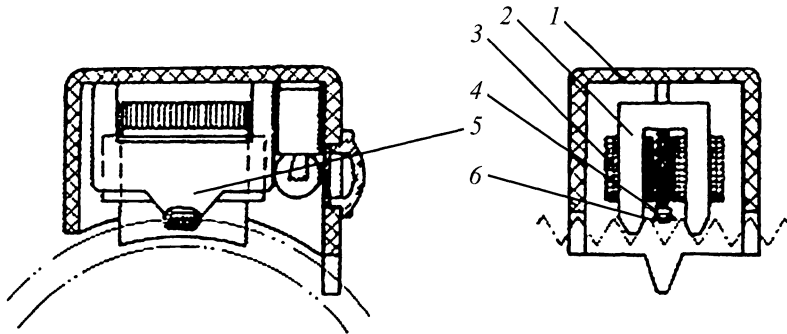


Рис. 10.13. Преобразователь дефектоскопа МД-2:

1 – корпус; 2, 3 – сердечники и обмотка электромагнита; 4 – индикаторная катушка; 5, 6 – держатель и сердечник индикаторной катушки

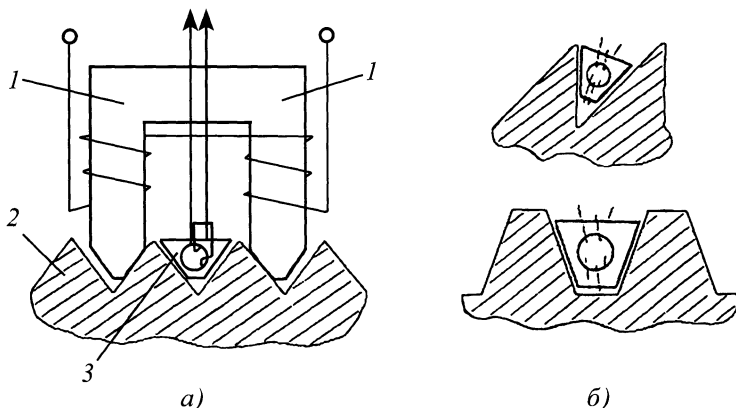


Рис. 10.14. Преобразователь дефектоскопа МД-4

Для уменьшения этого недостатка разработан прибор МД-4, использующий *дифференциальное включение* индикаторных катушек.

Прибор состоит из преобразователя и измерительного блока. Основу преобразователя (рис. 10.14, а) составляет электромагнит 1 переменного тока П-образной формы, между полюсами которого расположена индикаторная система 3.

Полюсы электромагнита выполнены в соответствии с профилем резьбы детали 2, благодаря чему плотно входят во впадины витков. Расстояние между центрами полюсов равно двойному шагу резьбы.

Индикаторная система 3 (рис. 10.14, б) представляет собой ферромагнитный сердечник, изготовленный по профилю контролируемой резьбы. Сердечник имеет в центре отверстие, сквозь которое проходят измерительные обмотки, одна над другой. Измерительные обмотки включены встречно.

Структурная схема дефектоскопа (рис. 10.15) содержит генератор 1 переменного тока звуковой частоты для питания электромагнита и преобразователя. Измерительные обмотки 2 и 3 индикаторной системы преобразователя подключены на вход усилителя-ограничителя 4. В схему также входят сигнальная лампа "Дефект" 5 и стрелочный индикатор 6.

Дефектоскоп работает следующим образом. Переменный магнитный поток, создаваемый электромагнитом, замыкается через контролируемый участок резьбы. Магнитный поток распространяется в основном по поверхности резьбы в области, находящейся между полюсами электромагнита, огибая поверхность витков резьбы. Между наклонными гранями нитки резьбы образуется поток рассеяния. Если ввести в нитку резьбы сердечник индикаторной системы, то поток рассеяния замкнется через него, причем этот поток, пройдя через сердечник, разделится на две части. Через верхнее плечо сердечника будет проходить поток рассеяния, образующийся ближе к верхним кромкам нитки резьбы, через нижнее плечо – ближе к основанию канавки резьбы.

В верхней 2 и нижней 3 измерительных обмотках наводится ЭДС, пропорциональная значениям соответствующих частей потока рассеяния и числам витков обмоток. Число витков подбирается таким образом, чтобы ЭДС обмоток были равны

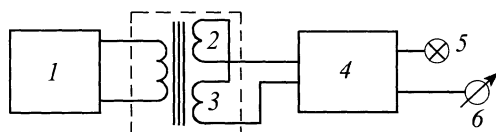


Рис. 10.15. Структурная схема дефектоскопа МД-4

при размещении преобразователя на заведомо бездефектном участке контролируемой резьбы.

При наличии дефекта, например трещины у основания граней витка резьбы, магнитное сопротивление этого участка резко возрастает. Это приводит к увеличению потока рассеяния. Причем напряженность поля потока рассеяния изменяется не одинаково: у основания нитки резьбы она увеличивается значительно больше, чем у вершины (подобно плоскому образцу, где поле рассеяния, обусловленное дефектом, уменьшается по мере удаления от дефекта). Вследствие этого магнитный поток через нижнее плечо сердечника индикаторной системы увеличивается значительно больше, чем поток через верхнее плечо, и ЭДС нижней обмотки возрастает более значительно, чем ЭДС верхней измерительной обмотки. Возникает разностный сигнал, который поступает на вход измерительного блока.

Такой прибор разработан специально для дефектоскопии резьбовых соединений упорного профиля, например в реакторах полиэтилена.

10.5.1. Прибор для обнаружения трещин в резьбах с токовой намагничивающей системой

Ряд недостатков описанных приборов с электромагнитными системами (сложность контроля первой нитки резьбы, а также ее захода и сгона, зависимость показаний от материала контролируемой детали термообработки и др.) устраняется при использовании *локального намагничивания* с помощью тока.

В процессе измерений преобразователь прибора накладывается на контролируемую резьбу и по специальным направляющим губкам передвигается вдоль нитки резьбы вручную.

В преобразователе (рис. 10.16) имеются два иглообразных электрода 1 и 2, которые опираются на смежные грани одного витка резьбы. При этом линия, соединяю-

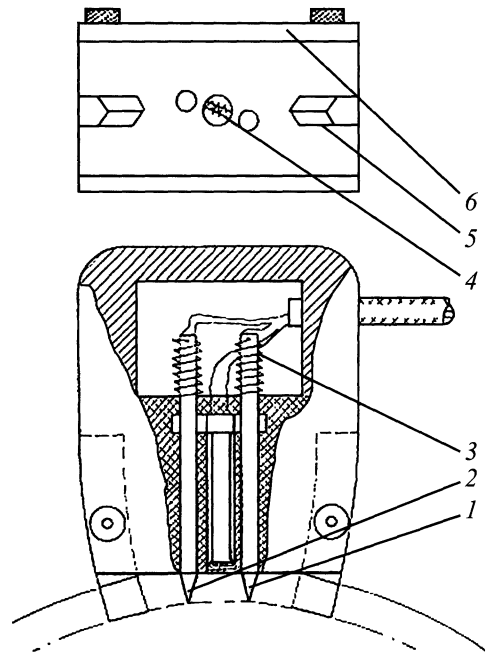


Рис. 10.16. Преобразователь дефектоскопа с локальным намагничиванием

щая точки касания электродов, образует угол $10 \dots 15^\circ$ с направлением нитки резьбы. К электродам подводится переменный ток (частота $3 \dots 5$ кГц, сила тока $10 \dots 12$ А) от усилителя мощности. Электроды прижимаются к резьбе пружинами 3. Между электродами помещен ферромагнитный сердечник 4 с измерительной катушкой. Ось сердечника лежит в плоскости осей электродов, перпендикулярно к ним.

В корпусе преобразователя имеются специальные канавки, в которых расположены направляющие дужки 5. Эти дужки выдвигаются из корпуса на расстояние, соответствующее диаметру резьбы, и фиксируются в выбранном положении винтами. Механическая прочность преобразователя обеспечивается металлическими крышками 6.

В плоскости скольжения преобразователя по резьбе для повышения износостойкости размещены металлические

вставки, предохраняющие от изнашивания корпуса и выхода из строя индикаторной катушки. Такая конструкция преобразователя позволяет контролировать детали с резьбой различного шага и диаметра. Минимальный шаг, который определяется перемещением электродов относительно образующей резьбы, равен 3 мм, минимальный диаметр зависит от расстояния между электродами.

Исследуемый участок детали намагничивается прямым переменным током, который подводится с помощью токоподводящих электродов 1, 2. Сердечник 4 индикаторной катушки расположен таким образом, чтобы тангенциальная составляющая возбуждающего поля пересекала его под прямым углом. При наличии дефекта направление тангенциальной составляющей изменяется и появляется поперечная тангенциальная составляющая напряженности поля, направленная вдоль сердечника, поэтому в индикаторной катушке появляется ЭДС, которая регистрируется измерительной схемой прибора.

10.5.2. Бесконтактный электромагнитный дефектоскоп резьбовых деталей

Важной задачей дефектоскопии деталей паропроводов, замков бурильных труб является выявление трещин в резьбовых соединениях, покрытых слоем окалины или продукта неферромагнитного происхождения. Бесконтактный электромагнитный прибор позволяет проводить контроль ферромагнитных деталей, покрытых слоем окалины толщиной до 0,2 мм с шагом резьбы от 6 мм и более. В приборе применены продольное намагничивание и двухчастотный метод измерения полей рассеяния, что позволяет контролировать резьбовые детали, покрытые слоем ржавчины или окалины.

Дефектоскоп (рис. 10.17, а) состоит из преобразователя (рис. 10.17, б) и электронного блока. Электромагнит 2 и чувствительный ферроэлемент 6 вмонтированы

в корпус 5 из коррозионно-стойкой стали. Полюсы электромагнита выведены наружу и обработаны совместно с основанием корпуса по профилю канавки резьбы таким образом, что касаются противоположных граней двух соседних витков. Ферроэлемент расположен между полюсами электромагнита на специальном штоке, с помощью которого в процессе настройки преобразователя производится установка оси ферроэлемента перпендикулярно к магнитному потоку электромагнита (см. рис. 10.17, б). Необходимая ориентация преобразователя в канавке резьбы осуществляется с помощью направляющих 3 и ограничительных упоров 4, зажимаемых винтами 5. Эбонитовая вставка 1 выполняет роль клеммника и крышки. Такая конструкция преобразователя позволяет перекрыть несколько типоразмеров контролируемых метрических и дюймовых резьб.

Ферроэлемент имеет две обмотки – возбуждающую и измерительную. С помощью электромагнита создается магнитный поток

$$\Phi_{\Omega} = \Phi_{\max \Omega} \sin(\Omega t),$$

направленный под углом 20 ... 25° к обрабатываемой резьбе. Поток замыкается через резьбовой участок, переходя с одной грани на другую через канавку резьбы. Если ферроэлемент ориентирован перпендикулярно к потоку, то в нем не будет наводиться ЭДС, обусловленная этим потоком.

При прохождении преобразователя над трещиной, расположенной вдоль нитки резьбы (а усталостные трещины, как правило, распространяются именно так) происходит деформация магнитного поля в области дефекта. В результате этого появляется составляющая поля, направленная вдоль оси ферроэлемента.

Для повышения чувствительности к малым полям рассеяния от дефектов в приборе используется способ двойного преобразования по частоте, причем ферроэлемент, реагирующий на изменение

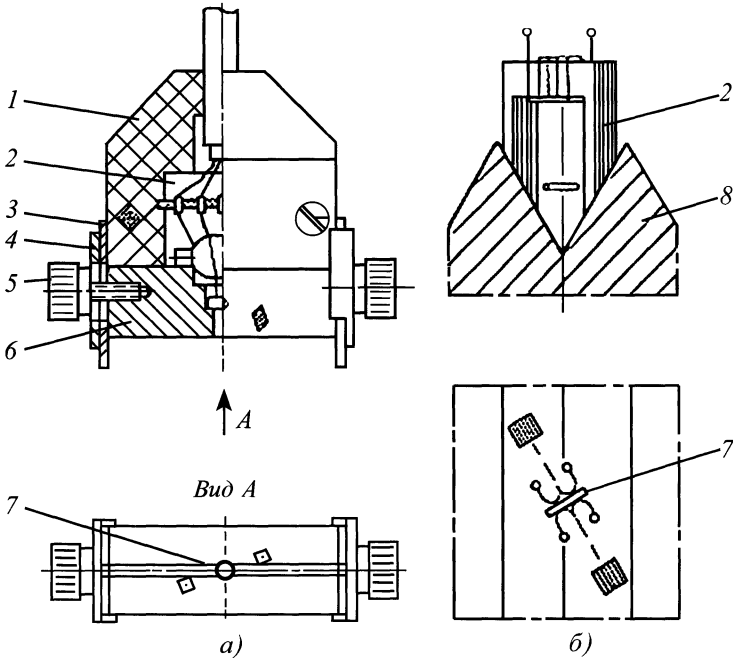


Рис. 10.17. Преобразователь бесконтактного электромагнитного дефектоскопа

тангенциальной составляющей поля $H_T \Omega$, возбуждается высокочастотным полем H_ω и подмагничивается слабым постоянным полем H_0 . В этом случае индукция в сердечнике ферроэлемента является функцией трех полей:

$$B = f(H_\omega; H_0; H_T \Omega).$$

Если из спектра ЭДС, наводимой во вторичной обмотке ферроэлемента, выделить вторую гармонику 2ω высокочастотного сигнала, промодулированную удвоенной частотой низкочастотного поля $H_{2\Omega}$ после предварительного детектирования, и в качестве параметра (сигнала), характеризующего измеряемое поле, использовать напряжение, пропорциональное глубине модуляции $M_{2\Omega}$, вторая гармоника выражается через величину измеряемого поля следующей зависимостью:

$$M_{2\Omega} = KH_{д\Omega}^2,$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров ферроэлемента (магнитной проницаемости формы сердечника m , коэрцитивной силы материала сердечника и т.п.); $H_{д\Omega}$ – направленная вдоль оси ферроэлемента поперечная тангенциальная составляющая магнитного поля, обусловленная дефектом.

При таком способе обработки сигнала кроме высокой чувствительности достигается хорошая устойчивость к помехам, значительно повышается соотношение сигнал/шум, поскольку в результате двойного преобразования снижается уровень помех, обусловленных как посторонними электромагнитными полями, так и собственными высокочастотными (H_ω) и намагничивающим низкочастотным (H_Ω) полями.

На рис. 10.18 приведена структурная схема прибора. Генератор низкой частоты ГНЧ вырабатывает напряжение ($\Omega = 85$ Гц) для питания электромагнита преобразователя. Генератор высокой частоты

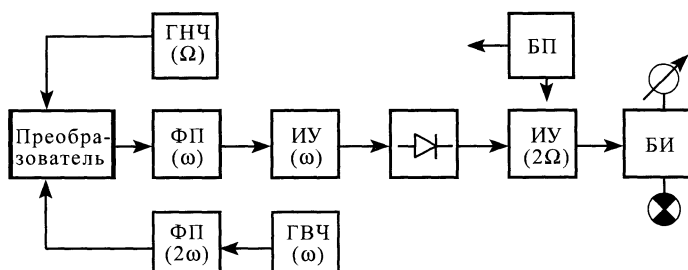


Рис. 10.18. Структурная схема бесконтактного электромагнитного дефектоскопа

ГВЧ и фильтр-пробка ФП (2ω) обеспечивают синусоидальное напряжение ($\omega = 10$ кГц) для возбуждения ферроэлемента. Другая фильтр-пробка ФП (ω) и избирательный усилитель ИУ (2ω) служат для выделения второй гармоники высокочастотного сигнала измерительной обмотки ферроэлемента. Протестированный сигнал поступает на избирательный усилитель ИУ (2Ω), где выделяется вторая гармоника низкочастотного напряжения, несущая информацию о дефекте.

Дефектоскоп работает следующим образом. При размещении преобразователя на заведомо бездефектном участке резьбы ручкой ограничения устанавливается такой пороговый уровень, чтобы стрелка микроамперметра блока индикации БИ отклонилась на одно-два малых деления, подтверждая только работоспособность прибора. При прохождении над дефектным местом поле в пространстве между полюсами электромагнита деформируется и на сердечник ферроэлемента действует составляющая поля, обусловленная дефектом. После предварительного усиления, фильтрации и детектирования выделяется сигнал частотой 2Ω .

10.5.3. Дефектоскопы зубчатых колес главных судовых редукторов

В основу работы названных приборов положен электромагнитный метод, сущность которого заключается в сле-

дующем. Контролируемый участок зуба локально намагничивают переменным полем, а о дефекте судят по изменению поперечной тангенциальной составляющей магнитного поля. Локальное намагничивание осуществляется синусоидальным током, подводимым к контролируемой поверхности с помощью двух токоподводящих электродов таким образом, чтобы прямая, проходящая через точки касания этих электродов, составила угол α с вероятным направлением распространения усталостной трещины по витку зуба.

На рис. 10.19 показано взаимное расположение токоподводящих электродов, оси первичного преобразователя (ферроэлемента) и контролируемой поверхности зуба. Преобразователь прибора выполнен в виде корпуса, в котором размещены подпружиненные токоподводящие электроды и ферроэлемент с механизмом перестройки ориентации оси ферроэлемента относительно линии, соединяющей точки касания токовых электродов. В преобразователе предусмотрены направляющие, обеспечивающие фиксацию его во впадине между зубьями заданного модуля. Токоподводящие электроды при установке преобразователя во впадине опираются на смежные поверхности профиля зуба выше средней линии CC_1 на 1 ... 2 мм.

Локальное намагничивание осуществляется переменным током промышленной частоты (50 Гц) с амплитудой до 5 А. В качестве первичных преобразователей

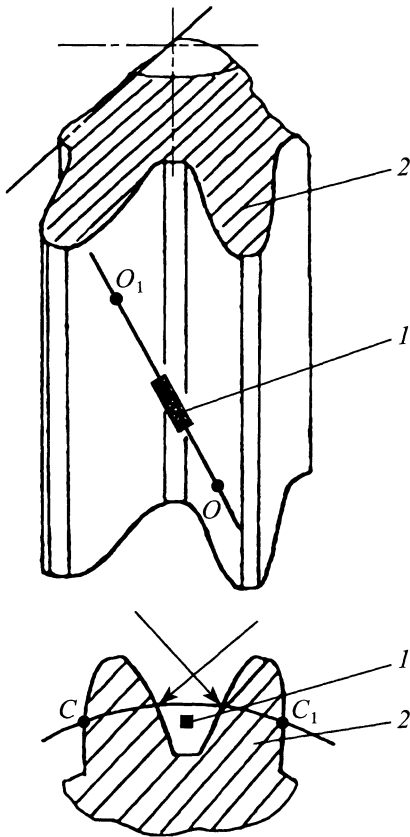


Рис. 10.19. Взаимное расположение токоподводящих электродов, ферроэлемента и контролируемой поверхности зуба:

1 – ферроэлемент; *2* – контролируемая поверхность зуба; *O*, *O*₁ – точки касания токовых электродов; *CC*₁ – средняя линия

используется один ферроэлемент. Для повышения чувствительности и помехоустойчивости прибора обработка информации о дефекте ведется по амплитуде и фазе первой гармоники огибающей, модулирующей вторую гармонику ЭДС, наведенной во вторичной обмотке ферроэлемента.

Прибор работает следующим образом. При установке преобразователя на заведомо бездефектный участок проводится настройка ферроэлемента с помощью механизма перестройки так, чтобы

магнитное поле рассеяния, обусловленное намагничивающим током, минимально воздействовало на сердечник ферроэлемента.

Вследствие этого ЭДС высокой частоты, наводимая в измерительной обмотке ферроэлемента, не модулируется намагничивающим низкочастотным полем. При прохождении преобразователя над дефектным участком, например над усталостной трещиной, расположенной вдоль впадины у корня ножки зуба, результирующее магнитное поле деформируется. Появляется поперечная тангенциальная составляющая, воздействующая на сердечник ферроэлемента. В результате на измерительной обмотке ферроэлемента ЭДС высокой частоты оказывается промодулированной частотой намагничивающего поля. Из спектра ЭДС, наведенной в измерительной обмотке ферроэлемента, выделяется вторая гармоника возбуждающего тока. После детектирования и фильтрации высших гармоник первая гармоника огибающей усиливается и поступает в блок амплитудно-фазовой обработки и далее на устройство световой сигнализации.

Обследование контролируемой поверхности проводится вручную путем установки преобразователя, соответствующего заданному модулю, во впадину между зубьями и постепенного перемещения его вдоль образующей. За один проход контролируется вся поверхность впадины зуба, ограниченная линиями, образуемыми точками касания токовых электродов.

Приборы нашли широкое применение для выявления усталостных трещин в зубьях зубчатых колес судов. Контроль осуществляется непосредственно на судне без разборки редуктора через смотровые люки его верхней крышки. Это позволяет не только сократить сроки обследования, но и осуществлять техническое диагностирование редуктора во время стоянки судна на рейде или при проведении грузовых операций. Какой-либо специальной

подготовки к выполнению контроля, кроме последовательного вскрытия смотровых люков на крышках редукторов, не требуется. Результаты контроля в отдельных случаях были подтверждены капиллярным методом, а также вырубкой дефектного участка зуба. Прибором надежно фиксировались усталостные трещины длиной 20 ... 300 мм, глубиной от 0,5 мм до сквозных трещин, выходящих на противоположную поверхность зуба.

Своевременное обнаружение усталостных трещин делает возможным предупреждение аварийных ситуаций путем снижения передаваемой мощности, разгрузки поврежденной части зуба опилкой профиля или удаления поврежденного участка зуба вырубкой.

10.5.4. Базовые магнитные дефектоскопы

Базовые магнитные дефектоскопы предназначены для обнаружения поверхностных трещин в зубьях стальных прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых колес диаметром от 200 мм с нормальными модулями зацепления 4,5; 5,0; 6,0; 8,0 мм, в галтельных (радиусных) переходах деталей с радиусом кривизны 6 ... 30 мм минимальным диаметром 200 мм, в резьбовых частях болтов, шпилек, крюков и других ответственных деталей из ферромагнитных сталей с диаметром не менее 28 мм. Шаг контролируемой резьбы: метрической, дюймовой, треугольной, трубной – от 2 до 12 мм, трапецеидальной – 3, 5, 8 и 12 мм; шероховатость поверхности контролируемых деталей – не ниже $Rz40$.

Приборы позволяют обнаружить трещины, расположенные:

- по всей поверхности впадин зуба, ограниченной делительной окружностью и ориентированные вдоль зуба или под углом до 30° к образующей и удаленные от края изделия не менее чем на 25 мм;
- вдоль нитки резьбы в глубине впадины, ограниченной средним диаметром

метрического, дюймового и треугольного профиля, а также ориентированные под углом до 15° к образующей резьбы;

- во впадине резьбы трапецеидального профиля (с шагом до 5 мм) или в углах впадины (с шагом более 5 мм);

- на поверхности средней части галтельного (радиусного) перехода шириной (5 ± 1) мм и ориентированные вдоль образующей галтельного перехода или под углом к ней до 15° .

В зависимости от назначения приборы созданы в четырех модификациях: 1) для обнаружения усталостных трещин в резьбах метрического, дюймового, треугольного профилей; 2) для контроля трапецеидальной резьбы; 3) для контроля зубчатых колес; 4) для обнаружения усталостных трещин на радиусных переходах. Приборы имеют общий электронный блок и комплект сменных преобразователей.

На рис. 10.20 показано взаимное расположение токоподводящих электродов и контролируемой поверхности. В одних случаях (например, при контроле резьб с малым шагом или галтельных переходов) токоподводящие электроды подходят по нормали к контролируемой поверхности, в других (например, при контроле зубьев крупного модуля) – составляют с контролируемой поверхностью угол, отличный от 90° , что обуславливает наличие начального уровня сигнала даже при точной настройке ферроэлемента.

Конструкция преобразователей аналогична применяемым в вышеописанных приборах. Локальное намагничивание также осуществляется переменным током промышленной частоты с амплитудой до 4 А.

Прибор работает следующим образом. При установке преобразователя, соответствующего контролируемому профилю поверхности (резьбы, зуба, радиусного перехода), на заведомо бездефектный участок выбирается фаза опорного сигнала так, чтобы стрелочный индикатор отклонялся не более чем на 10 ... 20 делений. При прохождении преобразователя

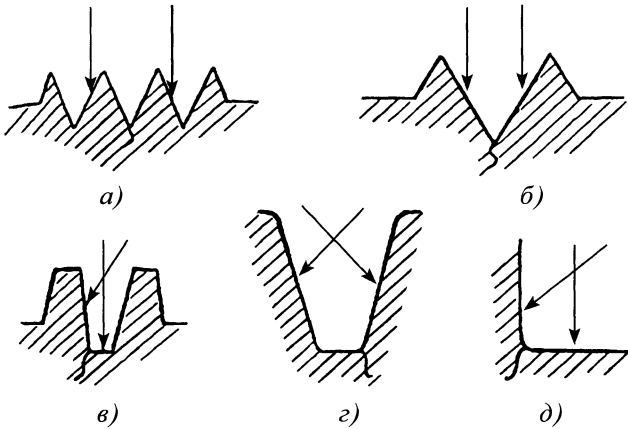


Рис. 10.20. Расположение токоподводящих электродов на контролируемой поверхности:

а, б – резьб метрического профиля с шагом до 2,5 и 3 ... 8 мм соответственно;
в – резьб трапецидального профиля с шагом 8 ... 12 мм; *г* – зубьев крупного модуля;
д – галтельных (радиусных) переходов

над дефектным участком, например над усталостной трещиной, расположенной вдоль витка резьбы, результирующее поле деформируется. Появляется дополнительная поперечная тангенциальная составляющая, обусловленная дефектом, фаза которой будет изменяться также вместе с амплитудой, причем с ростом глубины трещины возрастает. В результате на измерительной обмотке ферроэлемента ЭДС высокой частоты оказывается промодулированной частотой намагничивающего поля. Из спектра ЭДС, наведенной в измерительной обмотке ферроэлемента, выделяется вторая гармоника возбуждающего тока. После детектирования и фильтрации выделяется первая гармоника огибающей, усиливается и поступает на вход синхронного детектора. При этом огибающая будет изменяться не только по амплитуде, но и фазе. Такая схема обработки позволяет повышать достоверность контроля за счет одновременного учета как амплитуды, так и фазы огибающей, обусловленной трещиной.

В комплект прибора входят имитаторы для проверки работоспособности прибора. Они представляют собой проводник,

с помощью которого моделируется поле дефекта. Работа с имитатором проводится в такой последовательности. Имитатор с помощью специальных направляющих фиксируется на преобразователе таким образом, чтобы прямой проводник имитатора, сориентированный вдоль оси ферроэлемента, проходил на расстоянии 6 ... 8 мм от него и составлял с ним угол 3 ... 5°. При пропускании по этому проводнику намагничивающего тока возникает магнитное поле, поперечная составляющая которого эквивалентна напряженности поля от дефекта минимальной глубины. В приборе предусмотрен режим проверки работоспособности с помощью дополнительной фазосдвигающей цепочки *RC*, обеспечивающей постоянный фазовый сдвиг на 15°.

Замена настроечных образцов имитаторами предложенной конструкции позволяет повысить метрологические параметры прибора и исключить комплекты настроечных образцов, прикладываемые к прибору.

На рис. 10.21 приведены фотографии макрошлифов участков с трещинами, обнаруженными приборами.

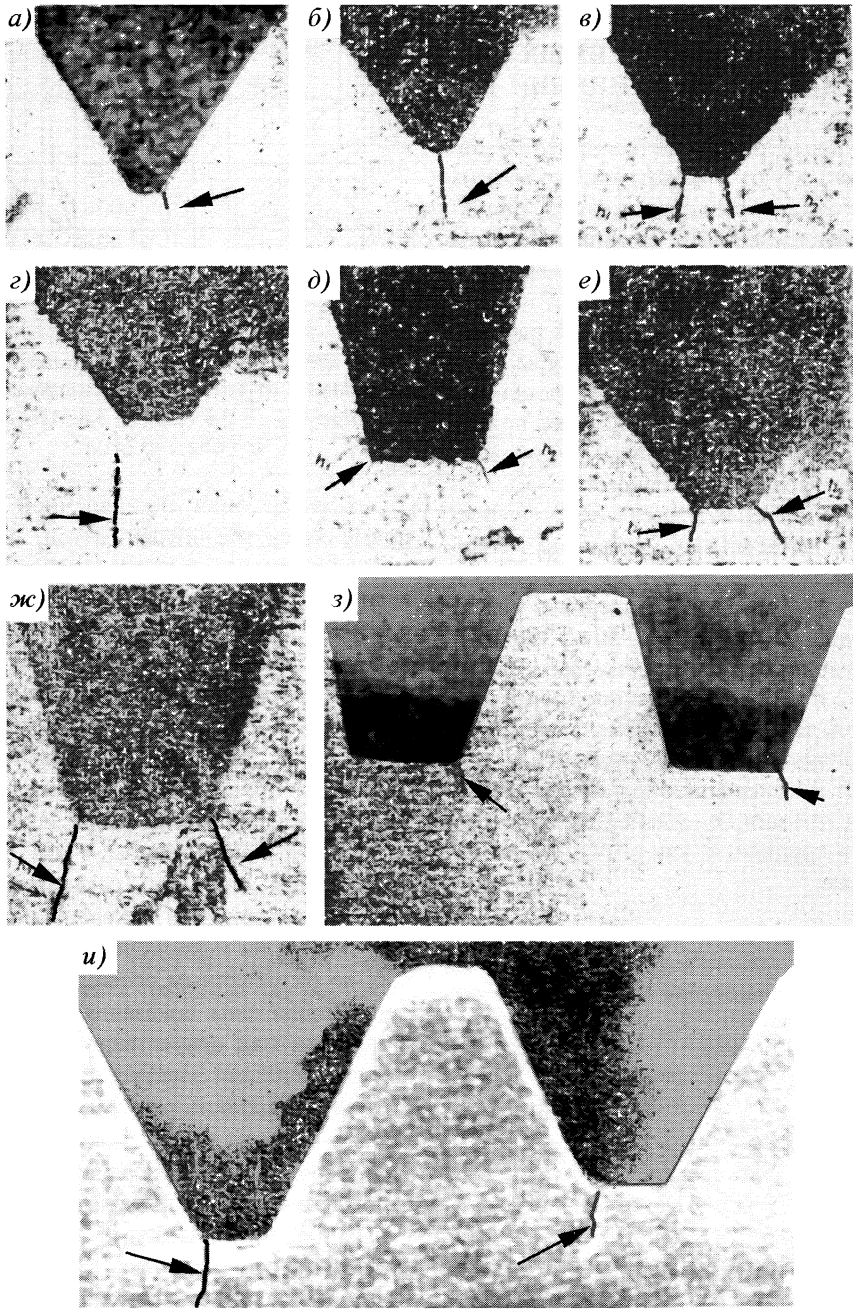


Рис. 10.21. Макрошлифы дефектных участков, обнаруженных дефектоскопами при глубине дефекта h_1, h_2 , мм:
a - 0,3; *б* - 2; *в* - 0,16 и 0,25; *г* - 1,1; *д* - 0,16 и 0,25; *е* - 0,16 и 0,15; *ж* - 1,35 и 0,65;
з - 0,35 и 1,05; *и* - 0,63

10.6. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Силовые резьбовые соединения широко используют в конструкциях многих машин, установок, сооружений. Например, в главном разьеме атомного реактора более 100 таких соединений, в крупных транспортных самолетах – до 10^6 .

Общее повышение значений рабочих параметров (давления, температуры, скорости, грузоподъемности) современных машин и установок обуславливает применение высоконагруженных (силовых) резьбовых соединений диаметром 300 ... 1000 мм в тяжелых прессах, технологических и испытательных установках сверхвысокого давления, до 200 мм в атомных и химических реакторах, анкерных связях строительных сооружений, 50 ... 180 мм – в газотурбинных двигателях, парогенераторах, 30 ... 60 мм – в авиационной и космической технике. Экстремальные условия эксплуатации перечисленных узлов приводят к зарождению и развитию усталостных трещин, с дальнейшим переходом их в хрупкие, и, как результат, к разрушениям.

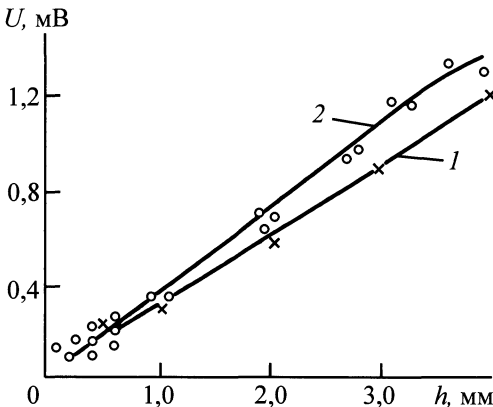


Рис. 10.22. Зависимость показаний прибора от глубины искусственных (1) и естественных (2) дефектов

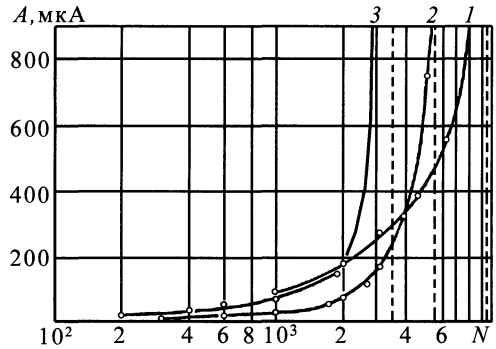


Рис. 10.23. Зависимость показаний прибора A от числа циклов нагружения N при $P_{\max} = 3,0$ МН (1), 3,8 МН (2) и 4,55 МН (3)

Для решения поставленной задачи применяется магнитный метод, основанный на регистрации поперечной тангенциальной составляющей, обусловленной дефектом. С помощью приборов можно не только обнаруживать усталостные трещины, но и оценивать их протяженность и относительное изменение параметров.

На рис. 10.22 приведена зависимость показаний прибора от глубины усталостных трещин, полученная при испытаниях образцов с шагом резьбы 4 мм. Глубина усталостных трещин, соответствующая показаниям прибора, измерена микроскопом БМИ-1 на макрошлифах, изготовленных по размеченным сечениям. Для сравнения приведены показания прибора при измерении над искусственными дефектами, нанесенными электроискровым способом на поверхность резьбы (внутри канавки).

С помощью прибора изучен момент зарождения и кинетики развития усталостных трещин в резьбовых соединениях в условиях малоциклового нагружения на натурных шпильках, используемых в атомных водо-водяных энергетических реакторах.

На рис. 10.23 приведены кривые изменения максимальных показаний прибора – от момента зарождения магистраль-

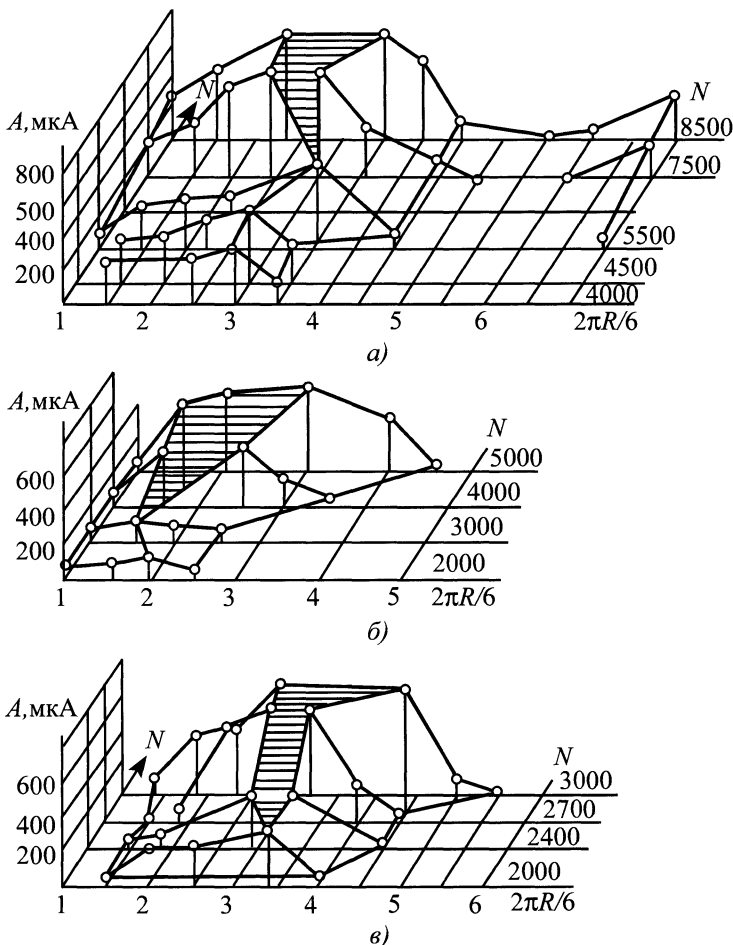


Рис. 10.24. Изменение показаний прибора A вдоль витка резьбы с усталостной трещиной при разных значениях P_{\max} и N ($2R$ – наружный диаметр резьбы шпильки):

$a - P_{\max} = 3,0$ МН; 1 – $N = 4000$; 2 – 4500; 3 – 5500; 4 – 7500; 5 – 8500 циклов;
 $б - P_{\max} = 3,8$ МН; 1 – $N = 2000$; 2 – 3000; 3 – 4000; 4 – 5000 циклов; $в - P_{\max} = 4,55$ МН;
 1 – $N = 2000$; 2 – 2400; 3 – 2700; 4 – 3000 циклов

ной усталостной трещины до полного разрушения образца. Штриховые вертикальные линии соответствуют числу циклов, при котором произошел разрыв шпильки. В зависимости от числа циклов нагружения N , а также от нагрузки P_{\max} зарождение и рост трещин происходят по-разному: чем больше P_{\max} , тем на более ранней стадии зарождается усталостная трещина и тем круче ее рост, а уста-

lostное разрушение шпильки происходит при меньшем числе циклов. Так, если для $P_{\max} = 3,0$ МН (кривая 1) обрыв произошел при $N = 10^4$ циклов, то для $P_{\max} = 4,55$ МН (кривая 3) – при $N = 3,5 \cdot 10^3$ циклов.

Рис. 10.24 иллюстрирует изменение показаний прибора вдоль развивающейся усталостной трещины в зависимости от числа циклов нагружения при разных значениях P_{\max} . Ход кривых позволяет

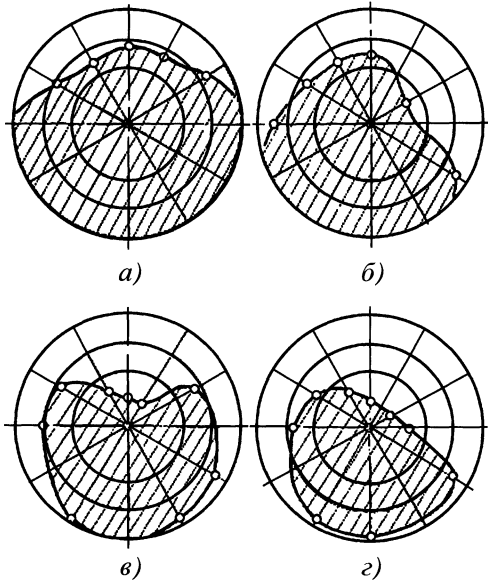


Рис. 10.25. Кинетика развития усталостной трещины в сечении шпильки в условиях знакопеременного нагружения при $P_{\max} = 3,0$ МН:
 $a - N = 4000$; $б - 5500$; $в - 7500$;
 $г - 8500$ циклов

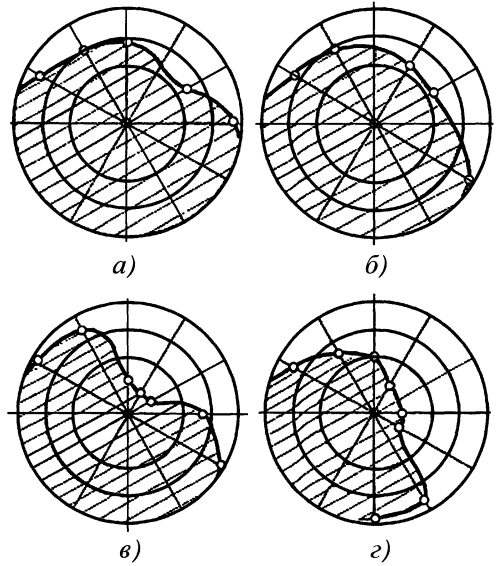


Рис. 10.27. Кинетика развития усталостной трещины в сечении шпильки в условиях знакопеременного нагружения при $P_{\max} = 4,55$ МН:
 $a - N = 2000$; $б - 2400$; $в - 2700$;
 $г - 3000$ циклов

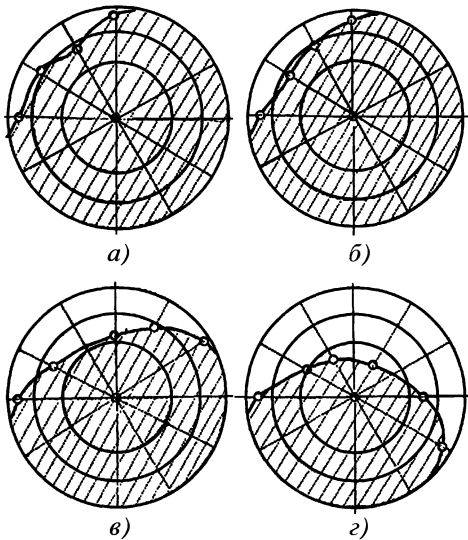


Рис. 10.26. Кинетика развития усталостной трещины в сечении шпильки в условиях знакопеременного нагружения при $P_{\max} = 3,8$ МН:
 $a - N = 2000$; $б - 3000$; $в - 4000$;
 $г - 5000$ циклов

сделать важный вывод о том, как развивается усталостная трещина вдоль витка, как распространяется ее фронт в сечении шпильки и как изменяется глубина усталостной трещины по длине. Так, при малых значениях P_{\max} фронт трещины развивается в основном вдоль впадины. По мере увеличения числа циклов скорость роста глубины трещин (если судить по относительным показаниям прибора) возрастает, а на стадии перед окончательным разрушением шпильки этот процесс происходит при малых значениях P_{\max} .

Кинетику развития усталостных трещин в сечении шпильки при различных амплитудах нагружения и разных значениях числа циклов N отражают рис. 10.25–10.27, которые также дают представление о процессе распространения фронта трещин по витку.

Практический интерес представляют экспериментальные данные, полученные

при обзорном обследовании всей резьбовой поверхности (10 ... 12 витков). Наряду с возникновением и развитием магистральной трещины в первом витке наблюдается увеличение (со знаком минус) показаний прибора в соседних витках. Так, на рис. 10.28 представлены показания прибора при обзорном обследовании резьбовой поверхности шпильки после 6500 и 7500 циклов нагружения для каждого витка в точках, лежащих на прямой, которая проходит через максимум показаний над основной трещиной (расположенной в k -м витке) параллельно продольной оси шпильки. Видно, что рост положительных показаний в витке с основной трещиной имеет определенную связь с ростом отрицательных показаний в соседних витках. Возможно, это связано с перераспределением внутренних напряжений в этих витках вследствие образования и роста основной трещины.

На рис. 10.29 приведены показания прибора, изменяющиеся вдоль витка с основной трещиной, после 6500, 7500 и 8500 циклов нагружения; φ – угловая координата участка контроля для k -го витка. Здесь интересно возникновение отрицательных показаний по краям трещины, характеризующейся положительными показаниями прибора, и исчезновение их далее с одновременным расширением основной трещины – участка с положительными показаниями. Области по краям трещины, сопротивляясь разрыву, вызывают появление трещин в соседних витках. Это тем заметнее, чем больше амплитуда нагружения P_{\max} шпильки. Как видно по рис. 10.28 и 10.29, отрицательные показания существенно дополняют картину развития трещин при нагружении шпильки.

Можно предположить, что изменение показаний в отрицательную сторону сви-

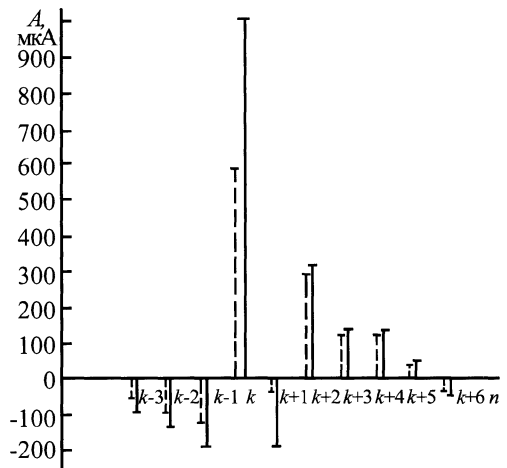


Рис. 10.28. Распределение показаний прибора по виткам резьбы n при $P_{\max} = 3,0$ МН после 6500 (штриховые линии) и 7500 циклов нагружения (сплошные линии)

детельствует о перераспределении внутренних остаточных напряжений, обусловленных усталостными проявлениями, в условиях упругопластического циклического деформирования. Это, как следствие, приводит к изменению магнитной проницаемости и электрической проводимости. Фиксирование прибором маг-

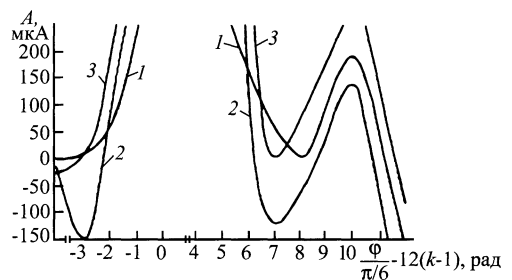


Рис. 10.29. Распределение показаний прибора вдоль витка резьбы с основной усталостной трещиной при $P_{\max} = 3,0$ МН после циклового нагружения: 1 – $N = 6500$; 2 – 7500; 3 – 8500 циклов

нитных полей со знаком минус может быть объяснено с помощью выражения

$$\Delta H = \frac{H_m}{2} \frac{\Delta \mu}{\mu} \sin(2\alpha),$$

где ΔH – изменение напряженности магнитного поля, обусловленное изменением

$\Delta \mu$ относительной магнитной проницаемости μ ; H_m – напряженность приложенного магнитного поля; α – угол между образующей витка и направлением приложенного магнитного поля H_m .

В процессе испытаний угол α , обусловленный конструкцией первичного преобразователя, остается постоянным.

Часть 2

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ

Большинство свойств сталей и сплавов определяется их внутренним строением. Имея достоверные методы определения внутреннего строения (атомно-кристаллической структуры составляющих фаз и ее несовершенств, микроструктуры, микро- и макрораспределения легирующих элементов) сталей, можно оценить различные физико-механические характеристики стальных изделий.

Магнитные свойства, как известно, весьма чувствительны к изменениям, происходящим в фазовом и химическом составе, структурном и напряженном состояниях сталей и сплавов. Именно высокая чувствительность магнитных свойств к указанным факторам стала основой для создания нового научного направления магнитного структурно-фазового анализа.

Основная задача магнитной структурографии – установление закономерных связей между магнитными свойствами металлов и сплавов и их структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами, на основе которых разрабатываются методы и средства неразрушающего контроля промышленных изделий. Метод магнитного структурного анализа, созданный на стыке физики магнитных явлений и физического металловедения, базируется на современной теории ферромагнетизма, развитие которой В.К. Аркадьевым, С.В. Вонсовским, Я.И. Френкелем, Я.Г. Дорфманом, Н.С. Акуловым, Е.И. Кондорским, К.П. Беловым, Я.С. Шуром, Р.И. Янусом и другими учеными в нашей стране, а также Р. Бозортом (США), Р. Беккером, М. Керстеном и В. Дерингом (Германия), Л. Неелем (Франция), С. Ти-

кадзуми (Япония) позволило понять природу процессов намагничивания и перемагничивания такого гетерогенного ферромагнетика, как сталь. Работы А.С. Займовского, Б.Г. Лившица, В.С. Меськина, С.С. Штейнберга, В.Д. Садовского, Г.В. Курдюмова, Б.А. Апаева, К.Н. Сироты, А.П. Гуляева, Р. Кана, Е. Берковича, Е. Кнеллера в области физики магнитных явлений, физического металловедения и материаловедения сыграли важную роль в разработке физических основ возможности использования магнитных свойств для оценки структурного состояния и фазового состава сталей и сплавов.

Особое место в развитии магнитного структурного анализа принадлежит двум школам физиков-магнитологов Н.С. Акулова, М.Н. Михеева и Р.И. Януса, трудами которых заложены основы практического использования магнитных методов контроля качества термической и химико-термической обработки изделий, текстурного анализа сталей. Начатые ими работы продолжают успешно развиваться. Систематическое изучение магнитных, электрических и механических свойств сталей различного назначения позволяет ответить на многие вопросы по возможности оценки структуры, фазового состава и прочностных характеристик поверхностно и объемно-упрочненных изделий из этих сталей. Выявленные особенности изменения магнитных свойств при вариации режимов термической обработки (закалка и отпуск) сталей разных классов в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов очень важны при создании аппаратуры НК.

Практическое решение широкого круга задач структуроскопии стальных и чугуновых изделий стало возможным благодаря разработкам новых магнитных и электромагнитных методов контроля с решением соответствующих проблем по разработке и созданию принципиально новых первичных преобразователей. Работы Н.С. Акулова, Н.Н. Зацепина, В.Г. Герасимова, А.Л. Дорофеева, М.Н. Михеева, Ф. Ферстера сыграли важную роль в развитии и создании средств электромагнитной и магнитной структуроскопии сталей.

Систематические исследования магнитных и электрических свойств сталей в состоянии поставки, а также после различной термомеханической, термической и химико-термической обработки, начатые в 30-х годах XX в. и проводимые по настоящее время, позволяют определить основные области применения методов магнитной структуроскопии:

- определение структурного состояния и механических свойств холодно- и горячекатаных сталей;
- контроль структурного состояния и прочностных характеристик объемно-термообработанных стальных и чугуновых

изделий (отжиг, нормализация, закалка, отпуск и старение);

- определение фазового состава и пористости, выявление пара- и ферромагнитных участков с различающимися физическими свойствами в литых, металло-керамических изделиях и сварных соединениях;

- оценка напряженного состояния и его изменений в материалах и конструкциях после термической обработки и пластического деформирования, а также в процессе эксплуатации;

- выявление кристаллографической текстуры, анизотропии механических свойств при пластическом деформировании листового проката;

- контроль структуры, физико-механических свойств и толщины упрочненного слоя после обработки изделий различными методами (закалка ТВЧ, химико-термическая обработка, упрочнение концентрированными потоками энергии, виброупрочнение, обезуглероживание в стали и отбел в чугуне);

- сортировка изделий по маркам, качественная оценка содержания основных легирующих элементов;

- определение кристаллографической структуры.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СО СТРУКТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Разработка современных методов магнитного и электромагнитного определения структурного состояния, химического и фазового составов, физико-механических характеристик материалов и изделий включает следующие этапы:

1) фундаментальное изучение связей магнитных и электрических свойств со структурным состоянием, химическим и фазовым составами, комплексом механических свойств сталей и сплавов;

2) создание аппаратуры электромагнитного неразрушающего контроля с решением соответствующих магнитостатических и магнитодинамических задач.

Без четкого представления о процессах перемагничивания в сталях и сплавах и влиянии на них различных по свойствам фаз и структурных факторов невозможно решение задач первого этапа магнитного структурного анализа.

11.1. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

В основе неразрушающих методов контроля лежит взаимосвязь магнитных и механических свойств сталей и сплавов, которая определяется структурным состоянием, химическим и фазовым составом вещества. Не все магнитные свойства одинаково чувствительны к изменению структурного состояния и фазового состава вещества. Так, температуру Кюри T_c , константы естественной кристаллографической анизотропии и намагниченность насыщения следует отнести к структурно-нечувствительным или слабо чувствительным магнитным свойствам, которые в

основном определяются количеством, типом атомов и их расположением в кристаллической решетке. Эти магнитные свойства не зависят от структурного состояния ферромагнетика, т.е. от уровня внутренних микронапряжений, от наличия границ зерен, неферромагнитных включений и дисперсных выделений. На них также не влияют ни форма, ни размеры ферромагнетика, и их чаще всего используют для оценки изменений, происходящих в химическом и фазовом составе сталей и сплавов. Эти свойства называют *первичными*.

Кривая намагничивания, форма и площадь петли магнитного гистерезиса, а также основные параметры, характеризующие их, существенным образом зависят от структурного состояния и фазового состава ферромагнетика. Они могут быть отнесены к структурно-чувствительным характеристикам. Эти свойства считают *вторичными*, в отличие от первичных они чувствительны к кристаллографической текстуре, изменениям напряжений, микроструктуры, формы и размеров ферромагнетика.

Структурно-чувствительные магнитные характеристики анизотропны. Монокристаллы ферромагнетиков имеют оси (направления) легкого и трудного намагничивания. Для железа, имеющего кубическую объемно-центрированную решетку, направлением легкого намагничивания является ребро куба [100], а трудно – пространственная диагональ [111]. У никеля решетка кубическая гранецентрированная, легкими направлениями являются пространственные диагонали [111], а трудными – [110]. Кобальт имеет гексагональную решетку, направлением легкого намагничивания является [0001], а

трудного – [1010]. Зависимость процессов намагничивания от кристаллографических направлений можно проследить на примере кривых намагничивания для Fe, Ni и Co (см. рис. 1.18).

При прокатке металла или направленной кристаллизации и рекристаллизации возникает текстура, которая приводит к появлению анизотропии магнитных свойств, поэтому результаты измерения магнитных параметров, связанных с магнитной анизотропией, можно использовать для анализа текстуры и физико-механических свойств металла в различных направлениях. При образовании твердых растворов внедрения решетка может быть сильно искажена, что также может привести к анизотропии магнитных свойств. Примером служит мартенсит, имеющий тетрагональную объемноцентрированную решетку, эффективная константа анизотропии отдельной игл которого растет по мере увеличения растворенного в решетке углерода.

11.1.1. Причины магнитного гистерезиса

Теория магнетизма для большинства задач магнитного структурного анализа не может предсказать количественную связь между магнитными параметрами и структурным состоянием ферромагнетика. Однако ее можно успешно использовать для качественного описания закономерностей изменения магнитных свойств при структурно-фазовых превращениях в сталях.

Современная теория указывает на три возможные причины магнитного гистерезиса.

1. Гистерезис, обусловленный необратимыми процессами вращения векторов намагниченности, когда в ферромагнетике (предварительно намагниченном до насыщения) в отсутствие поля нет зародышей обратной магнитной фазы и отсутствуют условия для ее образования при перемagnetивании.

2. Гистерезис, вызванный задержкой роста зародыша обратной магнитной фазы вследствие увеличения площади поверхности и поверхностной энергии граничного слоя, отделяющего зародыш от основного домена.

3. Гистерезис, обусловленный необратимыми смещениями доменных границ в результате их взаимодействия с неоднородностями материала и разного рода дефектами кристаллического строения.

В реальных ферромагнетиках гистерезис обусловлен, как правило, двумя или тремя причинами, но возможен случай, когда одна из них преобладает.

Необходимым условием реализации в ферромагнетике первой причины, приводящей к гистерезису, является сохранение однодоменного состояния частиц вплоть до напряженностей обратного магнитного поля, при которых совершается необратимый процесс вращения. Однородное вращение векторов намагниченности может наблюдаться в материалах с высокой степенью однородности состава и структуры, например в бездислокационных кристаллах ("усах"). Можно предположить, что в ферромагнетике имеется эффективное поле, которое препятствует отклонению элементарных магнитных моментов материала от оси легкого намагничивания. Такое поле получило название *поля анизотропии* в материале. Для магнитоодносного кристалла напряженность поля анизотропии

$$H_a = 2K_{\text{эф}}/(\mu_0 M_s), \quad (11.1)$$

где $K_{\text{эф}}$ – эффективная константа анизотропии.

Величина эффективной константы анизотропии определяется естественной кристаллографической анизотропией K , а при наличии в кристалле значительных внутренних напряжений σ_i еще и магнитоупругой анизотропией:

$$K_{\text{М ВПД}} = \beta \sigma_i \lambda_s, \quad (11.2)$$

где β – коэффициент (порядка единицы); λ_s – магнитострикция насыщения.

Для ферромагнитных частиц возможно также возникновение анизотропии формы в результате различия значений коэффициентов размагничивания вдоль $N_{||}$ и поперек N_{\perp} частицы. Поле анизотропии формы

$$H_a = K_{\Phi} / (\mu_0 M_s), \quad (11.3)$$

где K_{Φ} – константа анизотропии формы:

$$K_{\Phi} = (N_{||} - N_{\perp}) \mu_0 M_s^2. \quad (11.4)$$

Сопоставление коэрцитивной силы железа и углеродистых сталей с полем анизотропии ($H_a \approx 500$ А/см) показывает, что в этих материалах гистерезис не связан с первой причиной.

Гистерезис, обусловленный задержкой роста зародышей обратной магнитной фазы, имеет место практически во всех ферромагнетиках. Возможный механизм сохранения зародышей обратной магнитной фазы рассмотрен В.Ф. Брауном, С.В. Вонсовским и Я.С. Шуром. Они предположили, что в ферромагнетике, намагниченном до насыщения, остаются области с противоположным направлением вектора намагниченности. Критическое поле, необходимое для уничтожения таких областей, может превышать значение поля, необходимого для насыщения образца. Механизм зарождения областей с обратной намагниченностью в достаточной степени еще не выяснен. Процесс зародышеобразования характеризуют полем зародышеобразования H_n , которое требуется для отклонения намагниченности от исходного однородно намагниченного состояния. Теоретически в однородном ферромагнетике зародышеобразование должно начинаться при полях, близких к H_a , но, как правило, наблюдается при $H_a > H_c$.

Причинами легкого образования зародышей (локального неоднородного вращения вектора намагниченности) могут быть сильные размагничивающие поля, возникающие вблизи пор, трещин, не-

магнитных включений, на острых углах и выступах кристалла.

Д. Гудинаф, рассмотрев вопрос о возникновении зародышей перемагничивания, пришел к выводу, что местами зарождения могут быть границы зерен, а также пластинчатые выделения с кристаллической решеткой, отличной от матрицы (например, цементит в углеродистой стали). Предположив, что границы зерен являются возможными источниками зародышей перемагничивания, размеры которых определяются величиной зерна, он получил выражение для части коэрцитивной силы, зависящей от величины зерна:

$$H_c = \frac{15}{16} \frac{\pi \gamma}{\mu_0 M_s} \frac{1}{d_3}, \quad (11.5)$$

где γ – энергия доменной границы, отделяющей зародыш от остальной части кристалла; d_3 – средний размер зерна.

В то же время границы зерен являются препятствиями для смешивающихся доменных границ. Таким образом, увеличение размеров зерна, уменьшение протяженности границ в ферромагнетике должно сопровождаться снижением величины коэрцитивной силы.

Экспериментальная проверка, выполненная многими исследователями, указывает на то, что теория хорошо согласуется с экспериментом. Так, для железа различной степени чистоты было получено эмпирическое уравнение

$$H_c = A/d_3 + B, \quad (11.6)$$

в котором коэффициенты A и B зависят от степени легирования и количества примесей в железе (d_3 измеряется в см). Рис. 11.1 иллюстрирует зависимость коэрцитивной силы от размера зерна для чистого железа и низкоуглеродистой стали.

Другим возможным местом легкого образования зародышей перемагничивания могут являться локальные области с существенно пониженной константой анизотропии, например участки, обогащенные легирующими элементами или имеющие значительные локальные микронапряже-

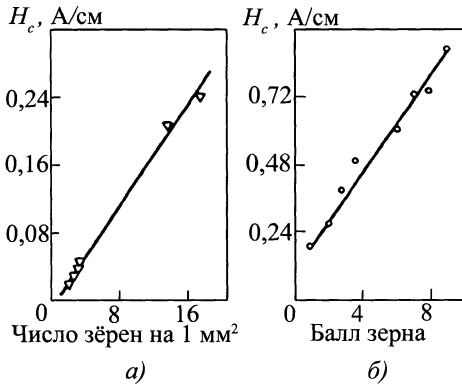


Рис. 11.1. Зависимость коэрцитивной силы от размера зерна:

a – для чистого железа ($\approx 0,002\%$ C);
б – для мартеновской низкоуглеродистой стали

ния (связанные с дефектами типа дислокаций, с неоднородной деформацией при фазовых превращениях).

Состояние образовавшегося зародыша обратной магнитной фазы в идеальном кристалле является нестабильным, поэтому он при определенных условиях может продолжить рост или, наоборот, уничтожиться. Так, при анализе работ К. Сиктуса и Л. Тонкса, В. Деринг, не выясняя причин возникновения зародышей, рассмотрел условия необратимого роста сильно вытянутых зародышей эллипсоидальной формы и теоретически получил выражение для поля старта H_0 , определяющего начало процесса перемагничивания:

$$H_0 = H_k + a [\gamma / (\mu_0 M_s d)], \quad (11.7)$$

где H_k – критическое поле, необходимое для преодоления смещающейся доменной границей всех потенциальных барьеров, возникающих из-за наличия разного рода дефектов в реальном ферромагнетике; a – коэффициент (порядка единицы); d – максимальный диаметр поперечного сечения зародыша.

В таких ферромагнетиках, как железо и его сплавы, зародышеобразование происходит легко, поэтому коэрцитивная сила в основном определяется величиной H_k , т.е. вступает в силу третий вид (причина) гистерезиса.

11.1.2. Влияние напряжений на процессы перемагничивания

В случае легкого зародышеобразования перемагничивание будет происходить путем смещения доменных границ, а коэрцитивная сила будет определяться величиной H_k :

$$H_c \sim H_k = \frac{1}{2\mu_0 M_s} \left(\frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial x} \right)_{\max}, \quad (11.8)$$

где $(\partial \bar{\gamma} / \partial x)_{\max}$ – среднее значение градиента энергии доменных границ.

Вычисление величины H_k связано с определенными трудностями, поскольку в ферромагнетиках не известна зависимость энергии доменных стенок от координат.

Связав изменение граничной энергии с изменением магнитоупругой энергии в ферромагнетике, Е.И. Кондорский получил следующее выражение для критического поля и коэрцитивной силы:

$$H_c \sim H_k \sim \frac{\delta \lambda_s}{\mu_0 M_s} g_{\max}, \quad (11.9)$$

где δ – ширина доменной стенки; λ_s – магнитострикция насыщения; $g_{\max} = (\partial \sigma_i / \partial x)_{\max}$ – максимальный градиент внутренних напряжений.

Выражение (11.9) можно представить в виде

$$H_c \sim p_0 \frac{\lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{\mu_0 M_s}, \quad (11.10)$$

где $\Delta \bar{\sigma}_i$ – среднее значение амплитуды внутренних напряжений; p_0 – дисперсность внутренних напряжений, определяемая отношением ширины доменной стенки к средней длине "волны напряжений" l ; при $l \gg \delta$ и $l \ll \delta$ соответственно

$$H_c = \frac{\lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{\mu_0 M_s} \frac{\delta}{l}; \quad H_c = \frac{\lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{\mu_0 M_s} \frac{l}{\delta}. \quad (11.11)$$

Проанализировав выражения (11.11), можно отметить, что значение коэрцитивной силы будет максимально при условии,

если дисперсность внутренних напряжений близка к единице, т.е. $l \approx \delta$.

Качественно теория напряжений достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами, но при количественных расчетах к ней нужно подходить осторожно, поскольку в теории не учитывается источник самих напряжений. В ферромагнетиках источниками внутренних напряжений могут быть дислокации, имеющиеся в большом количестве даже в недеформированных кристаллах. Число дислокаций сильно увеличивается при пластической деформации и закалке стали.

Влияние внутренних микронапряжений наиболее заметно для однородных материалов, лишенных заметных количеств примесей, которые обладают значительной магнитострикцией и имеют низкую константу кристаллографической анизотропии (например, никель, у которого $\lambda_{100} = 4 \cdot 10^{-6}$ и $K = 4,9 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$). В материалах с низкими значениями констант магнитострикции (для железа $\lambda_{100} = 19,5 \cdot 10^{-6}$) основной вклад в эффективную константу анизотропии вносит кристаллографическая анизотропия, которая, как правило, велика (для железа $K \approx 4,8 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$). Для материалов с большим количеством примесей, локально меняющих кристаллографическую анизотропию, при расчете критического поля необходимо учитывать изменение энергии поверхностного натяжения границы и магнитоэстетической энергии при переходе доменной стенки через включения.

11.1.3. Влияние включений и концентрационных неоднородностей на процессы перемагничивания

Учитывая изменение энергии поверхностного натяжения границы, М. Керстен провел оценку критического поля, когда в ферромагнетике присутствуют неферромагнитные и слабоферромагнит-

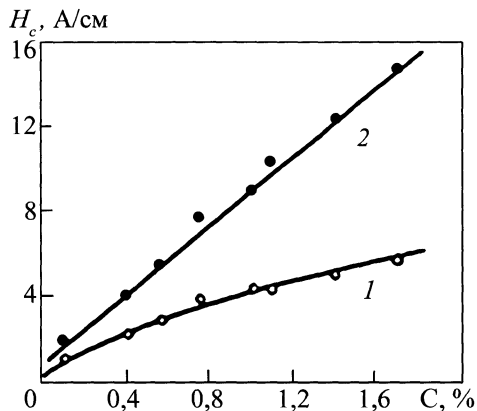


Рис. 11.2. Зависимость коэрцитивной силы от содержания углерода в железе в форме зернистого (1) и пластинчатого (2) цементита

ные включения в виде сфер диаметром d , образующие кубическую решетку с параметром s :

$$H_c \approx H_k \approx \frac{K\delta}{\mu_0 M_s d} v^{2/3}, \quad (11.12)$$

где v – относительная объемная концентрация включений; K – константа анизотропии.

Начальную восприимчивость можно выразить следующим образом:

$$\chi_{нач} = \frac{2\mu_0 M_s^2 s^2}{\pi \gamma d}. \quad (11.13)$$

Коэрцитивную силу, полученную из теории включений, можно записать как

$$H_c = p \frac{K_{эф}}{\mu_0 M_s} v^n, \quad (11.14)$$

где $K_{эф}$ – эффективная константа магнитной анизотропии; p – фактор, зависящий от степени дисперсности включений (при $\delta \ll d$ $p \approx \delta/d$, при $\delta \gg d$ $p \approx d/\delta$); n – показатель степени, который в зависимости от вида включения может иметь значения 1, 2/3, 4/3 и т.д.

Максимального значения коэрцитивная сила достигнет при $d \approx \delta$.

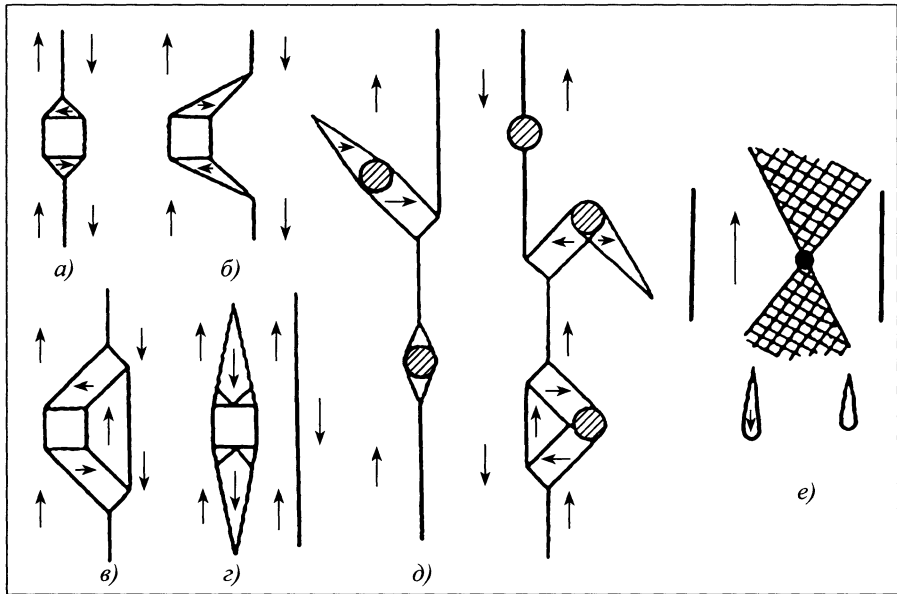


Рис. 11.3. Типичные замыкающие доменные структуры на включениях (а-д) и искажения доменной структуры (е)

Эта теория сопоставлена с результатами измерений, выполненных на углеродистых сталях, где углерод, находящийся в связанном состоянии в форме цементита, играет роль включений. Было установлено, что при содержании углерода до 2 % значение H_c действительно пропорционально объему включений в степени $2/3$. На рис. 11.2 показана зависимость коэрцитивной силы от массовой доли углерода. Кривые построены в соответствии с теорией включений. Следует отметить, что при относительно крупных включениях ($d > \delta$) и их значительной объемной концентрации ($v > 0,01$) выражение (11.14) становится малоприменимым для вычисления коэрцитивной силы.

При расчете коэрцитивной силы ферромагнитных материалов, имеющих крупные включения ($d > \delta$), необходимо учитывать магнитные поля рассеяния, возникающие на поверхности включений или пустот, поскольку в данном случае изменения магнитостатической энергии в 200 раз больше изменения плотности гранич-

ной энергии. Следуя этому предположению, Л. Неель теоретически предсказал возможность существования замыкающих доменов на включениях с $d \gg \delta$, значительно снижающих магнитостатическую энергию. На рис. 11.3 представлены наиболее типичные случаи замыкания доменной структуры на включениях, а также искажения доменной структуры вследствие существования напряженной зоны около включений.

Возможным местом образования зародышей являются включения или пустоты, имеющиеся в большом количестве в реальном ферромагнетике. Рост возникающего зародыша может прекратиться при встрече с включениями, размеры которых меньше по сравнению с критическими размерами зародыша d_0 , несмотря на то что приложенное поле больше, чем поле старта H_0 . При прохождении доменной стенки через включение потребуются совершить работу A_1 , связанную с увеличением поверхности доменных границ на величину $\Delta S \sim \pi d^2/4$, и работу A_2 , обуслов-

ленную перераспределением магнитных зарядов на поверхности включения:

$$A_1 \approx \frac{\pi d^2}{4} \gamma; \quad A_2 \approx \frac{\mu_0 C N M_s^2}{2} \frac{\pi}{6} d^3, \quad (11.15)$$

где C – численный коэффициент (порядка единицы); N – средний коэффициент размагничивания включения.

Сопоставив выражения для A_1 и A_2 , получим, что при $d < \delta$ преобладает A_1 , в то время как $A_2 \approx 0$. При $d \approx \delta$ величины A_1 и A_2 одного порядка, и при больших размерах включений ($d \gg \delta$) $A_1 < A_2$.

Сравнивая значение A_2 с приращением энергий во внешнем магнитном поле, можно оценить порядок величины критического поля, вызванного магнитным действием включений при условии $\delta < d < d_0$, т.е. в случае, когда растущий зародыш взаимодействует с включениями, размеры которых меньше критического (d_0). Значение критического поля

$$H_k \approx \frac{N M_s}{4} (v')^{2/3}, \quad (11.16)$$

где v' – объемная концентрация включений с диаметрами d в пределах $\delta < d < d_0$.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что в магнитомягких сталях концентрация мелких включений относительно невелика, т.е. $v' \ll v$ (v – полная объемная концентрация включений).

При наличии только дисперсных включений ($v' \approx v$) критическое поле

$$H_k \approx H_c \approx C \frac{N M_s}{4} (v')^{2/3} < H_0 \left(\frac{d}{d_{cp}} \right) \approx \frac{\gamma}{\mu_0 M_s d_{cp}}, \quad (11.17)$$

где d_{cp} – средний диаметр большинства включений.

В случае крупных включений ($v' \ll v$), присутствующих в ферромагнетике, напряженность критического поля определяется полем старта зародышей H_0

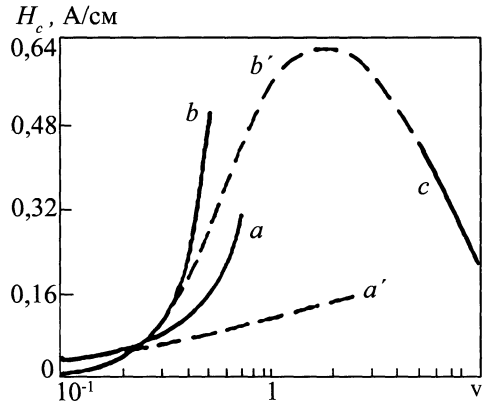


Рис. 11.4. Зависимость коэрцитивной силы от размеров включений:

a, b – влияние эффекта, обусловленного соответственно поверхностным натяжением доменной границы и наличием магнитных полей рассеяния; c – зависимость, рассчитанная для $d \gg \delta$ по формуле (11.18); a', b' – предполагаемое изменение H_c за счет поверхностного натяжения границы и изменения магнитостатической энергии при $d \approx \delta$

и критическим полем $H_k(\sigma)$, обусловленным наличием градиентов внутренних напряжений в ферромагнитной матрице (теория напряжений). При внешнем поле $H < H_0(d_{cp})$ мелкие включения задерживают рост зародышей, возникающих на более крупных включениях ($d > d_0$), и коэрцитивная сила определяется выражением (11.17). Если же поле достигает величины $H > H_0(d_{cp}) + H_k(\sigma)$, то начинается рост вторичной доменной структуры от многих включений и ферромагнетик перемагничивается, а критическое поле (следовательно, и H_0) определяется следующим образом:

$$H_k \approx H_c \approx H_0(d_{cp}) + H_k(\sigma) \approx \frac{\gamma}{\mu_0 M_s d_{cp}} + H_k(\sigma); \quad (11.18)$$

$$H_c \approx \frac{3k\gamma}{\mu_0 M_s d} v, \quad (11.19)$$

где $k = l/d$ – отношение удвоенной длины замыкающего домена к его диаметру.

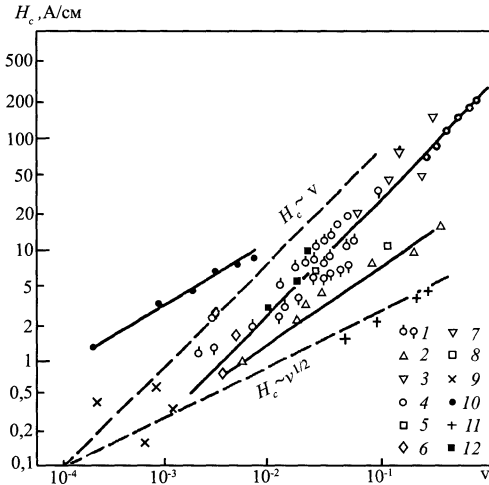


Рис. 11.5. Зависимость коэрцитивной силы от объема включений:

- 1 – Fe₃C; 2 – CuC; 3 – Fe₃Ti; 4 – Fe₃Mo₂;
- 5 – Fe₃P; 6 – Al₂O₃; 7 – Fe₃W₂; 8 – FeBe;
- 9 – C; 10 – Fe₄N; 11 – FeS; 12 – Fe₁₆N₂

Строго говоря, выражение (11.19) справедливо для включений, имеющих хорошо развитую вторичную доменную структуру.

Снижение магнитостатической энергии за счет образования вторичной доменной структуры существенно только для относительно крупных частиц (например, $d \approx 100\delta$), а для мелких частиц ($d \approx 10\delta$), по-видимому, необходимо учитывать и влияние изменения энергии поверхностного натяжения. Рис. 11.4 иллюстрирует

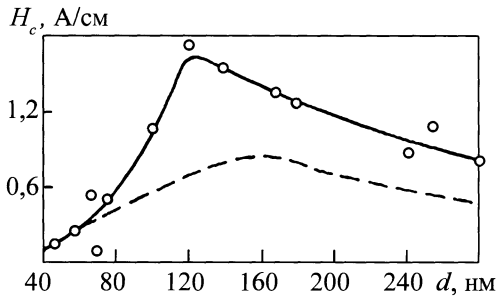


Рис. 11.6. Зависимость коэрцитивной силы от среднего размера выделившихся в железе частиц Fe₃C ($v = 0,003$)

поведение коэрцитивной силы в зависимости от размеров неферромагнитных частиц в случае их статистического распределения и постоянной доли ($v = 3 \cdot 10^{-3}$) в объеме железа.

Если включения ферромагнитны (как в случае цементита в стали), то следует учитывать намагниченность насыщения карбидной фазы, и выражение (11.17) примет вид

$$H_c \approx C \frac{N (M_s - M_k)^2}{M_s} v^{2/3}, \quad (11.20)$$

где M_k – намагниченность насыщения карбидной фазы.

На рис. 11.5 приведены экспериментальные результаты различных авторов, которые свидетельствуют о существовании зависимости коэрцитивной силы от объема включений в пределах $H_c \approx v^{1/2}$ и $H_c \approx v$. Поскольку эксперименты выполнены на разных материалах, для которых остались неконтролируемыми диаметр зерна, значения внутренних напряжений, форма и величина включений, то к ним следует относиться осторожно.

Коэрцитивная сила изменяется в зависимости от размера включений при их постоянном объеме ($v = 0,003$) по кривой с максимумом (рис. 11.6), причем максимум H_c приходится на средний размер частиц 120 нм (1200 Å), т.е. критический размер частиц соизмерим с толщиной доменной стенки (штриховая линия – расчетные данные).

Из анализа различных теорий коэрцитивной силы следует, что H_c является структурно-чувствительной характеристикой, реагирующей на нюансы изменения структурного состояния вещества. Однако использование теории коэрцитивной силы для точного количественного расчета процессов намагничивания и перемагничивания термически обработанных конструкционных сталей сталкивается с большими трудностями. При попытках определить коэрцитивную силу с учетом изменения эффективной константы анизотро-

пии получают очень большое значение, поскольку многие исходные данные взяты без учета реальной структуры или использованы параметры чистого железа. Даже учет всех факторов (степень тетрагональности мартенситной решетки, величина внутренних напряжений; объем, форма и в некотором приближении распределение в матрице ферромагнитных и неферромагнитных включений) позволяет лишь приблизительно вычислить значение коэрцитивной силы закаленных и отпущенных сталей. В связи с этим рассмотренные теории коэрцитивной силы можно использовать для качественного описания процессов перемагничивания в сталях при изменениях структурного состояния и фазового состава.

Кроме того, во всех рассмотренных теориях обсуждался вопрос о перемагничивании однофазных систем, имеющих неферромагнитные включения. В случае многофазных систем теория коэрцитивной силы заметно усложняется.

Результирующая коэрцитивная сила в этом случае будет зависеть от коэрцитивной силы, проницаемости и намагниченности каждой из фаз, относительного объема отдельных фаз и степени магнитного взаимодействия между ними. Теоретически эта задача не решена, поэтому для выявления закономерных связей между магнитными свойствами и структурным состоянием таких материалов огромную роль играют экспериментальные исследования, которые, в свою очередь, позволяют глубже понять физику процессов перемагничивания многофазных систем и решать задачи второго этапа, связанные с разработкой приборов неразрушающего контроля.

11.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СТАЛИ

При термической обработке в результате фазовых изменений и структурных превращений в стали могут присутство-

вать в определенных соотношениях различные фазы, которые при комнатной температуре являются равновесными (феррит, цементит, специальные карбиды) и неравновесными (аустенит и мартенсит). Изменение фазового состава стали сопровождается изменением ее механических и магнитных свойств.

Феррит – равновесный твердый раствор (внедрения) углерода и других примесей в α -железе. Различают две модификации феррита: низкотемпературный α -феррит и высокотемпературный δ -феррит. Для низкотемпературного феррита характерно незначительное растворение углерода. Максимальная растворимость в α -железе наблюдается при температуре 727 °С и составляет 0,02 %. При комнатной температуре растворимость менее 0,01 %, т.е. феррит в углеродистых сталях по физическим свойствам близок к чистому железу. Решетка феррита объемно-центрированная (см. рис. 1.18, а), атом углерода размещается в центре грани кубической решетки железа, а также в местах наличия вакансий, дислокаций и других дефектов подобного типа. У феррита, как и у чистого железа, три легкие оси намагничивания. Магнитные свойства монокристаллов феррита обладают магнитной анизотропией, поэтому значения измеряемых магнитных характеристик зависят от направления приложенного поля по отношению к кристаллографическим осям. Намагниченность насыщения феррита незначительно ниже намагниченности насыщения железа. Снижение намагниченности насыщения обусловлено растворением углерода.

Феррит – мягкая структурная составляющая – имеет следующие механические характеристики: временное сопротивление разрыву (предел прочности) $\sigma_b = 250$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 120$ МПа; относительное удлинение $\delta = 50$ %; относительное сужение $\psi = 80$ %; твердость по Бринеллю HB 80 ... 90 при содержании углерода в твердом растворе 0,006 %.

Мартенсит – неравновесный пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе с той же концентрацией, что и у исходного аустенита, т.е. образующийся твердый раствор может содержать углерода на два порядка больше нормальной растворимости в α -железе. Мартенсит имеет тетрагональную объемно-центрированную решетку (см. рис. 1.18, в). Тетрагональность мартенсита обусловлена внедрением атомов углерода в октаэдрические междоузлия решетки железа. Чем выше содержание углерода в стали, тем сильнее выражена тетрагональность решетки мартенсита (соотношение параметров решетки $c/a > 1$). Отношение периодов c/a и значение параметра решетки c возрастают с увеличением содержания углерода, а величина a несколько уменьшается:

$$c/a = 1 + \gamma P; c = a_0 + \alpha P; a = a_0 - \beta P, \quad (11.21)$$

где P – массовая доля углерода в твердом растворе; $a_0 \approx 0,3$ нм – параметр решетки α -железа; $\gamma = 0,046 \pm 0,001$, $\alpha = 0,116 \pm 0,002$ и $\beta = 0,013 \pm 0,002$ – коэффициенты.

Соотношения (11.21) достаточно хорошо выполняются для высокоуглеродистых и низколегированных малоуглеродистых сталей. В закаленной стали с содержанием углерода 1,78 % отношение осей c/a достигает 1,08.

При значительном легировании сталей Ni и Al обнаружено аномальное возрастание, а при легировании Mn – уменьшение соотношения c/a в зависимости от содержания углерода. Следовательно, можно предположить, что при образовании мартенситной структуры в стали, легированной Ni и Al, константа кристаллографической анизотропии будет несколько выше, чем в углеродистых сталях, и, видимо, следует ждать дополнительного увеличения коэрцитивной силы при легировании закаленной стали этими элементами. Присутствие в стали марганца, наоборот, должно сопровождаться некото-

рым снижением коэрцитивной силы.

Микроструктура мартенсита представляет собой кристаллы в форме пластинок, пересекающихся между собой под углами 60 и 120°. Кристаллы мартенсита редко попадают полностью в плоскость шлифа, поэтому они просматриваются на шлифах, особенно в высокоуглеродистых сталях, в виде игл, и к ним иногда применяют термин "игольчатый мартенсит". Для средне- и малоуглеродистых сталей с высокой температурой начала мартенситного превращения характерно образование пакетного, или реечного, мартенсита, т.е. наблюдаемый кристалл мартенсита состоит как бы из отдельных пластин, соединенных между собой посредством малоугловых границ. В пакетном мартенсите могут существовать тонкие прослойки остаточного аустенита шириной 10 ... 50 нм, которые располагаются преимущественно на границах реек или между пакетами в исходном аустенитном зерне.

Размеры кристаллов (игл) мартенсита зависят от диаметра исходного зерна аустенита. Как правило, кристалл мартенсита, который образуется первым, имеет наибольшие размеры, а последующие, стесненные в своем развитии, – меньшие. Если исходное зерно аустенита было мелким, то возникает так называемый бесструктурный мартенсит, истинное строение которого не выявляется металлографическим методом. Средние размеры кристалла мартенсита: длина 300 ... 400 нм, ширина 25 ... 40 нм, толщина 5 ... 6 нм.

Для мартенсита характерны достаточно высокие твердость и прочность, которые зависят от содержания углерода в пересыщенном твердом растворе. Для малоуглеродистого мартенсита с содержанием углерода 0,015 % $\sigma_b = 1000$ МПа, а при содержании углерода 0,6 ... 0,8 % $\sigma_b = 2600 \dots 2700$ МПа. Для углеродистых сталей твердость составляет 62 ... 65 HRC, что примерно в 5 ... 6 раз больше твердости феррита. Однако с повышением прочностных свойств мартенсита существенно

ухудшаются его пластические свойства.

Высокие прочностные характеристики мартенсита объясняются наличием особых микро- и субмикроскопических неоднородностей, связанных с нарушением кристаллического строения. К ним можно отнести дислокации, границы зерен и поверхности раздела кристаллов мартенсита, двойники, растворенные атомы углерода и различного рода примеси.

Магнитные и электрические свойства мартенсита зависят от содержания углерода и легирующих элементов в пересыщенном твердом растворе. Повышение содержания углерода приводит к увеличению коэрцитивной силы, электрического сопротивления и снижению намагниченности насыщения. Наличие тетрагональной решетки мартенсита и, как следствие, значительных внутренних микронапряжений в иглах мартенсита (до 600 МПа для стали с 0,3 % С) должно сопровождаться возникновением в них наведенной одноосной магнитной анизотропии и увеличением эффективной константы анизотропии. Подтверждением этого служат наблюдения на кристаллах мартенсита доменной структуры, которая похожа на доменную структуру магнитоодноосного кобальта. Мартенсит имеет наибольший удельный объем по сравнению с другими структурными составляющими, и поэтому при его образовании в стали возникают значительные микронапряжения, которые также влияют на магнитные свойства.

Аустенит – твердый раствор углерода и других легирующих элементов в γ -железе. Наибольшая растворимость углерода в γ -железе равна 2,14 %. Аустенит обладает невысокой твердостью и большой вязкостью. Для чистых железоуглеродистых сплавов аустенит устойчив только при температуре выше точки A_{c1} . Медленное охлаждение аустенита приводит к распаду на цементит и феррит, которые в момент образования создают механическую смесь, содержащую семь частей феррита и одну часть цементита. Эта

смесь носит название *перлита* и равномерно распределяется в оставшемся феррите в виде сферических и пластинчатых колоний. В сталях, закаленных на мартенсит, имеется определенное количество остаточного аустенита, который располагается между кристаллами мартенсита.

Аустенит имеет решетку гранцентрированного куба с параметрами большими, чем у чистого железа и мартенсита. Вследствие более плотной упаковки атомов в гранцентрированной решетке объем γ -железа несколько меньше объема α -железа (примерно на 2 ... 4 %) с тем же содержанием углерода.

Аустенит сплава Fe–C неферромагнитен, а в легированных сталях в зависимости от степени легирования может быть парамагнитным, антиферромагнитным и даже ферромагнитным. Аустенит имеет более высокое удельное электрическое сопротивление по сравнению с ферритом и мартенситом, обладает большей твердостью, чем феррит, пластичен с относительным удлинением 40 ... 50 %.

Цементит – химическое соединение углерода с железом (карбид железа Fe_3C) с содержанием 6,67 % С. Кристаллическая решетка цементита сложна. Цементит обладает высокой твердостью (> 800 НВ) и очень низкой пластичностью. При легировании сталей цементит может образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут быть замещены атомами неметаллов, а атомы железа – металлами. Физические свойства легированного цементита могут отличаться от свойств Fe_3C .

Цементит ферромагнитен при низких температурах. Температура Кюри цементита 210 °С, намагниченность насыщения $M_s \approx 8000$ А/см. При легировании стали никелем, ниобием, ванадием температура Кюри цементита не меняется. При легировании стали вольфрамом температура Кюри цементита несколько понижается и более значительно – при легировании молибденом. Особенно сильно понижает температуру Кюри марганец, растворя-

ющийся в цементите в больших количествах. Растворение атомов кобальта и никеля в цементите приводит к снижению удельной намагниченности насыщения. Цементит имеет высокие значения констант кристаллографической анизотропии: $K_1 = 1,18 \cdot 10^5$ Дж/м³ и $K_2 = 3,94 \cdot 10^5$ Дж/м³.

Высокая анизотропия приводит к магнитной одноосности частиц цементита. Наблюдаемые домены имеют различную ширину – $(5 \dots 100)10^{-8}$ м. Направления легкого намагничивания в частицах цементита совпадают с осью [001], а трудного – с осью [010]. Теоретические оценки дают толщину доменной границы порядка 8 нм. Коэрцитивная сила цементита должна быть очень высокой, гораздо выше коэрцитивной силы мартенсита. Различие магнитных свойств матрицы и цементита приводит к тому, что присутствие включений цементита в стали оказывает сильное влияние на процессы намагничивания и перемагничивания сталей. Помимо цементита в сильно легированных сталях присутствуют специальные карбиды с физическими свойствами, отличными от свойств цементита.

11.3. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Упрочнение отдельных фаз стали заключается в увеличении сопротивления пластическому деформированию, которое определяется перемещением дефектов кристаллической решетки – дислокаций. Различают несколько дислокационных механизмов упрочнения, связанных с уменьшением подвижности дислокаций.

Вклад механизмов торможения скользящих дислокаций в общий условный предел текучести ферритно-перлитных сталей приближенно можно представить как сумму следующих компонент:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р} + \Delta\sigma_{п} + \Delta\sigma_{д.ч} + \Delta\sigma_{д} + \Delta\sigma_{гр}, \quad (11.22)$$

где σ_0 – напряжение трения решетки α -железа; $\Delta\sigma_{т.р}$ – упрочнение твердого раствора феррита растворенными в нем легирующими элементами; $\Delta\sigma_{п}$ – упрочнения за счет образования перлита в нормализованных ферритно-перлитных сталях либо сорбита в улучшаемых сталях; $\Delta\sigma_{д.ч}$ – упрочнение дисперсионными частицами; $\Delta\sigma_{д}$ – упрочнение за счет повышения плотности дислокаций; $\Delta\sigma_{гр}$ – зернограничное упрочнение.

Эффект упрочнения твердого раствора при легировании определяется параметрами несоответствия атомных размеров и модулей упругости растворителя и растворенного вещества. Для оценки упрочнения, зависящего от этих факторов, обычно пользуются формулой

$$\Delta\sigma_{т.р} = \sum_{i=1}^n K_i C_i, \quad (11.23)$$

где K_i – коэффициент упрочнения α -железа при легировании каким-либо элементом с массовой долей 1 %; C_i – концентрация элемента, растворенного в α -железе. Упрочняющее действие атомов внедрения выше, чем атомов замещения.

Упрочнение за счет перлитной составляющей можно определить по формуле

$$\Delta\sigma_{п} = 0,24P_{п}, \quad (11.24)$$

где $P_{п}$ – массовая доля перлита, %.

Присутствие в стали когерентно и некогерентно связанных с матрицей включений приводит к упрочнению (дисперсионному) стали вследствие торможения скользящих дислокаций на этих дефектах. Например, для некогерентных карбидных частиц наилучшее согласие с экспериментом дает расчет дисперсионного упрочнения по механизму Орована:

$$\Delta\sigma_{д.ч} = \alpha_1 \frac{Gb}{2\pi(L-R)} \ln \frac{(L-R)}{2b}, \quad (11.25)$$

где α_1 – константа; L – усредненное расстояние между частицами; R – усредненный размер частиц.

Количественные теории деформационного упрочнения обстоятельно развиты только для монокристаллов. Однако большинство моделей деформационного упрочнения можно использовать и для сплавов. Все они приводят к следующей зависимости упрочнения сплавов от плотности дислокаций:

$$\sigma_d \sim \alpha_1 Gb\sqrt{N}. \quad (11.26)$$

Повышение прочности за счет границ зерен в материале можно определить как

$$\Delta\sigma_{\text{гп}} = K / \sqrt{d_{\text{ср}}}, \quad (11.27)$$

где K – коэффициент, зависящий от угла разориентации границ, степени упрочнения границ частицами карбидной фазы; $d_{\text{ср}}$ – средний размер зерна.

При оценке состояния упрочнения мартенсита следует учитывать также влияние дальнедействующих напряжений:

$$\Delta\sigma_{\text{д.н}} = \frac{\Delta a}{a} E, \quad (11.28)$$

где $\Delta a/a$ – относительная микродеформация решетки мартенсита; E – модуль упругости.

В структуре сталей после закалки присутствует остаточный аустенит, который приводит к изменению их механических свойств. Присутствие в стали остаточного аустенита можно учесть следующим образом:

$$\sigma = \sigma_m C_m + \sigma_a C_a, \quad (11.29)$$

где σ_m , C_m и σ_a , C_a – предел текучести и объемная доля мартенсита и остаточного аустенита.

Анализируя влияние различных структурных параметров на торможение скользящих дислокаций и задержку смещения доменных границ, можно отметить некоторую общность их влияния на меха-

нические и магнитные свойства. Так, повышение в структуре стали плотности дислокаций сопровождается увеличением прочностных характеристик и значений коэрцитивной силы. Следует отметить, что $\sigma_{0,2}$ и H_c пропорциональны \sqrt{N} . Рост микронапряжений в стали и увеличение объема перлитной составляющей в структуре стали сопровождаются повышением H_c и $\sigma_{0,2}$. Для перлита пластинчатой формы $H_c \sim v$, для зернистой – $H_c \sim v^{2/3}$ (см. рис. 11.2), тогда как значение $\sigma_{0,2}$ не зависит от его формы ($\sigma_{0,2} \sim v$). Увеличение размера зерна сопровождается снижением как $\sigma_{0,2}$, так и H_c , при этом $H_c \sim 1/d$, а $\sigma_{0,2} \sim 1/\sqrt{d}$.

Таким образом, наблюдающаяся общность влияния структурных факторов на магнитные и механические свойства предполагает возможность косвенного определения по магнитным параметрам прочностных характеристик сталей, имеющих разное структурное состояние.

После первых положительных результатов определения прочностных характеристик готовых изделий магнитными методами оказалось, что не всегда удается получить однозначную взаимосвязь между магнитными и механическими свойствами сталей, т.е. в ряде случаев вопросы контроля прочностных характеристик сталей оставались открытыми. Именно необходимость определить возможности использования магнитных и электромагнитных методов при контроле прочностных характеристик изделий стимулирует проведение исследований магнитных, электрических и механических свойств сталей после вариации различных видов упрочняющей обработки.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

При термической обработке изменяется внутреннее строение (микроструктура) стали, в результате чего изделия приобретают определенные физико-механические свойства. Основные технологические операции термической обработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск и старение.

12.1. ОТЖИГ СТАЛЕЙ

В черной металлургии наиболее распространенным видом термической обработки, позволяющей получить необходимые физико-механические свойства металлопродукции, является отжиг. Различают следующие виды отжига: гомогенизирующий, рекристаллизационный, отжиг для уменьшения напряжений, сфероидизирующий, нормализационный.

Основные параметры первых трех видов отжига – температура нагрева и время выдержки. Микроструктура стали последующих видов отжига зависит от степени переохладения аустенита и режима охлаждения.

Гомогенизирующему (диффузионному) отжигу для уменьшения внутрикристаллитной ликвации подвергают слитки высококачественной легированной стали. Из углеродистых сталей только автоматные стали подвергают гомогенизации. Для этого вида отжига, проводимого при высокой температуре, вследствие большого времени выдержки, необходимой для полного протекания диффузионных процессов в стали, характерно увеличение зерна, которое сопровождается изменением магнитных свойств стали. Часто гомогенизацию совмещают с операцией нагрева слитков перед обработкой давлением, уве-

личивая длительность выдержки при нагреве.

Рекристаллизационный отжиг проводят в целях восстановления пластичности стали после деформации: холодной прокатки листов и лент, холодного волочения труб, прутков и проволоки, холодной штамповки и других видов холодной обработки давлением. При таком способе отжига холоднодеформированной стали, варьируя способы обработки, одновременно можно достичь измельчения или укрупнения (если это требуется) зерна. Свойства холоднокатаной и отожженной сталей зависят от технологии выплавки, химического состава, технологии горячей и холодной прокатки, температуры отжига.

Горячекатаные стали поставляются как в термически обработанном состоянии (отожженном, нормализованном), так и без термической обработки (низкоуглеродистые стали). В последнем случае основными факторами, определяющими физико-механические свойства сталей, являются химический состав, температуры конца прокатки и смотки в рулон. Влияние указанных факторов на магнитные и механические свойства низкоуглеродистых сталей подробно изучено сотрудниками ИФМ УрО РАН, что позволило применить коэрцитиметрические методы для контроля прочностных и пластических свойств проката.

У низкоуглеродистых сталей с повышением температуры отжига до 400 °С механические свойства изменяются незначительно (рис. 12.1), так как в этом интервале особых изменений микроструктуры не наблюдается. Уменьшение внутренних напряжений в металле вызывает снижение

коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r . Максимальная μ_{max} и начальная $\mu_{нач}$ магнитные проницаемости при этом увеличиваются у сталей марок СтЗкп, 08Ю, 10кп и СтЗсп и практически остаются постоянными у сталей марок 08кп и 11ЮА. Основные изменения магнитных и механических свойств низкоуглеродистых сталей происходят в интервале температур 500 ... 600 °С, что объясняется снятием внутренних напряжений, изменением величины зерен и их ориентации, т.е. рекристаллизационными процессами. При дальнейшем повышении температуры отжига продолжается рост зерна (вторичная рекристаллизация), что вызывает увеличение магнитных проницаемостей, уменьшение коэрцитивной силы и остаточной индукции, твердости и предела прочности.

Установленные закономерности изменения магнитных и механических свойств холоднодеформированных низкоуглеродистых сталей в зависимости от температуры отжига свидетельствуют о возможности оценки механических свойств сталей по измерениям максимальной и начальной магнитных проницаемостей, коэрцитивной силы и остаточной индукции. Последние две характеристики являются предпочтительными, так как наиболее просты в измерении и менее подвержены влиянию мешающих факторов. Для контроля качества отжига представляют интерес интервалы температур 580 ... 700 °С или 680 ... 750 °С. Изменение магнитных свойств сталей в этих интервалах таковы, что позволяют надежно отбраковать магнитными методами листы, прошедшие отжиг при температурах ниже 550 °С, т.е. выделить брак по недогреву.

В технологическом интервале температур отжига изменение магнитных и механических свойств, как правило, невелико. Кроме того, на магнитные и механические характеристики сталей могут влиять колебания химического состава (в пределах допуска значения температуры конца прокатки) и степень обжатия до отжига (за

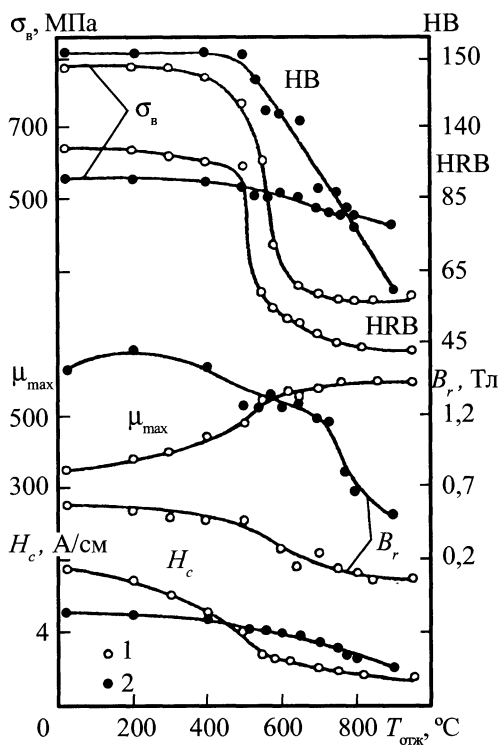


Рис. 12.1. Зависимости физико-механических характеристик холоднокатаной 08Ю (1) и горячекатаной 30Т (2) сталей от температуры отжига

счет изменения величины и формы зерна и т.п.). Поэтому широкому внедрению магнитных методов контроля качества отжига низкоуглеродистых сталей предшествуют исследования по установлению корреляционных связей между магнитными (например, H_c) и контролируемыми (чаще всего механическими) параметрами, а также по изучению влияния на них различных технологических факторов, определяющих истинный коэффициент этой связи для данных условий производства проката.

Механические свойства холоднокатаных листовых среднеуглеродистых сталей марок 35, 40, 45, 50 при низких температурах отжига (до 400 °С), как и у рассмотренных выше низкоуглеродистых сталей, практически не изменяются, в то время как величины H_c и B_r незначительно

уменьшаются. Структура образцов в данном интервале температур отжига представлена в основном сорбитом и пластинчатым перлитом (сталь 35), сорбитообразным и пластинчатым перлитом (стали 45 и 50) с вытянутыми, деформированными прокаткой зернами и ферритной полосчатостью. При температуре отжига выше 500 °С в структуре образуется точечный и зернистый перлит.

В интервале температур отжига 550 ... 800 °С, в котором указанные стали приобретают требуемые механические свойства, магнитные (H_c , B_r , μ_{\max}) и механические (твердость НВ и предел прочности σ_b) свойства имеют одинаковый характер изменения в зависимости от температуры отжига. При температурах отжига более 800 °С магнитные свойства обладают высокой чувствительностью к изменениям структуры, что создает благоприятные условия для отбраковки магнитными методами структур перегрева металлопродукции при отжиге.

Одинаковый характер зависимости физико-механических свойств от температуры рекристаллизационного отжига наблюдается и у холоднокатаных листовых сталей 65Г и 30ХГСА, что также свидетельствует о возможности контроля отжига этих сталей по магнитным параметрам (H_c , B_r).

Магнитные и механические свойства горячекатаных тонколистовых среднеуглеродистых (35, 40, 45 и 50), низколегированных (65Г) и легированных (30ХГСА) сталей при температурах отжига выше 600 °С имеют почти тот же характер изменения, что и у холоднокатаных сталей указанных марок (см. рис. 12.1). Следовательно, существует возможность контроля механических свойств данных сталей после технологического отжига (например, отжиг стали 30ХГСА осуществляется при 650 ... 675 °С по величинам остаточной индукции или коэрцитивной силы).

Изучение закономерностей связи магнитных и механических свойств сталей

различных классов позволило предложить ряд методик неразрушающего определения механических свойств проката. На предприятиях черной металлургии и машиностроения наибольшее распространение получили коэрцитиметры типа КИФМ, КРМЦ и импульсные магнитные анализаторы типа ИМА, с помощью которых контролируется свыше 30 млн т проката и труб.

При внедрении указанных приборов для учета конкретных особенностей технологического процесса на предприятии проводятся сбор и обработка статистических данных. Для каждого типоразмера проката и конкретной марки стали по уравнениям регрессии рассчитывают значения контролируемых параметров (предела текучести, предела прочности, относительного удлинения) для построения градуировочных кривых или таблиц соответствия между показаниями приборов и механическими свойствами.

При большом ассортименте видов и марок проката задача внедрения магнитных методов контроля его механических свойств становится трудоемкой. Сроки внедрения приборов НК можно значительно сократить заменой большого числа парных корреляционных зависимостей меньшим числом множественных регрессионных моделей, учитывающих одновременно марку стали, толщину и химический состав проката. Эта задача может решаться поэтапно.

Отжиг для снятия остаточных напряжений применяют в целях уменьшения внутренних напряжений в стали, возникающих не только вследствие неравномерного охлаждения после высокотемпературных технологических операций – горячего деформирования, сварки, но и после холодного деформирования и правки. Магнитные свойства чувствительны к холодному пластическому деформированию – наклепу (например, коэрцитивная сила при наклепе стали 20 повышается примерно в 1,5 раза).

Остаточные напряжения могут вызывать коробление изделий и изменение их размеров во время обработки, эксплуатации или хранения на складе. Наиболее опасны растягивающие остаточные напряжения, так как они, складываясь с приложенными извне сравнительно небольшими напряжениями, могут вызвать разрушение изделий. Поэтому необходимо полное или частичное снятие остаточных напряжений. Отжиг проводят при температурах 550 ... 650 °С. Скорость нагрева и особенно охлаждения должна быть невелика, чтобы исключить возможность образования новых остаточных напряжений.

Согласно теории напряжений, изменение уровня микронапряжений в ферромагнитном материале вызывает изменение значения коэрцитивной силы, что позволяет осуществлять контроль качества отжига изделий коэрцитиметрическими методами.

Сфероидизирующий отжиг проводят как для смягчения стали перед последующей обработкой резанием или деформированием в холодном состоянии, так и для получения соответствующей структуры под закалку. Такому отжигу подвергают заэвтектоидные углеродистые, легированные инструментальные и шарикоподшипниковые стали. При исходной структуре зернистого перлита наблюдаются меньшая склонность к росту аустенитного зерна, расширение допустимого интервала закалочных температур, снижение склонности к растрескиванию при закалке, повышение прочности и вязкости закаленной стали. При отклонении скорости охлаждения от требуемой существует опасность образования пластинчатого перлита.

К ослаблению корреляционной связи между коэрцитивной силой и твердостью приводит изменение размеров карбидных частиц и зерен феррита, а также неоднородностей распределения карбидов в матрице и их магнитных свойств (цементит, легированный цементит, специальные карбиды), значений остаточных напряже-

ний от предварительной механической обработки.

12.2. НОРМАЛИЗАЦИЯ

Нормализацию чаще всего применяют как промежуточную операцию для смягчения стали перед обработкой резанием, для устранения пороков ее строения и общего улучшения структуры перед закалкой. Эту операцию используют и как окончательную обработку средне- и высокоуглеродистых доэвтектоидных сталей. Структура и физико-механические свойства нормализованной стали зависят от скорости охлаждения.

Исследования магнитных, электрических и механических свойств сталей марок 10, 20, 35, 45, 10сп, 12Х1МФ, ШХ15, 18ХНВА и 20Х2Н4А, 12Х2МФСР, 20Г1ФЛ, 30ХЗМФ в сопоставлении с микроструктурой изделий показали возможность определения прочностных свойств (твердости, пределов прочности и текучести) указанных сталей по значению коэрцитивной силы.

12.3. ЗАКАЛКА СТАЛЕЙ

Закалка – процесс термической обработки, наиболее распространенный способ упрочнения изделий. Суть ее состоит в нагреве до температур в интервале $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращений и выше, выдержке при этих температурах и последующем охлаждении со скоростью выше критической. Результатом закалки является получение неравновесных структур мартенсита, а также продуктов распада аустенита по промежуточной ступени – бейнита и троостита.

Основные факторы, влияющие на структуру закаленной стали, – температура нагрева под закалку ($T_{\text{зак}}$), время выдержки при закалке и скорость охлаждения.

Температура нагрева для углеродистых сталей определяется диаграммой железо–углерод. Температуры закалки доэвтектоидных сталей на 30 ... 50 °С выше точки A_{c3} , а для заэвтектоидных сталей –

на 30 ... 50 °С выше точки A_{c1} . Некоторый перегрев вызван тем, что диаграмма железо–углерод справедлива для очень медленного нагрева. При быстром нагреве под закалку, например при индукционном, превращение перлита в аустенит происходит при более высоких температурах.

Выбор температуры закалки и времени выдержки сильно влияет на качество термической обработки изделий. Образовавшийся при нагреве стали аустенит, как правило, неоднороден даже в объеме одного зерна. В тех местах, где были пластинки (зерна) цементита, содержание углерода выше, чем там, где находились пластинки феррита. Чтобы ликвидировать эту неоднородность, необходимо нагреть сталь выше температуры перлитно-аустенитного превращения и сделать выдержку при этой температуре для завершения диффузионных процессов внутри аустенитного зерна.

Если температура будет недостаточно высокой (недогрев при закалке), то останется большое количество нерастворенных карбидов. Твердый раствор будет обеднен углеродом и легирующими элементами (в случае легированных сталей). Это приведет к тому, что в некоторых наиболее обедненных участках мартенситного превращения не произойдет. При малой скорости охлаждения в этом месте образуется структура троостита закалки, для которой характерны пониженные значения твердости, коэрцитивной силы и электрического сопротивления. Если объем образовавшегося троостита будет достаточно большой, то, измеряя магнитные и электрические характеристики, можно выявить его наличие в структуре закаленной стали.

Высокая температура нагрева (перегрев при закалке) способствует росту зерна аустенита и переходу большинства карбидов в твердый раствор. При закалке в крупных зернах аустенита получается очень грубая крупноигльчатая структура мартенсита, что является одним из видов

брака при закалке, поскольку ударная вязкость при наличии структур такого типа снижается. Исходная структура стали (форма и дисперсность карбидов) сильно влияет на величину зерна аустенита, которая оказывает последующее влияние на структуру мартенсита, образующегося при закалке. Поскольку основным структурным элементом, в котором начинается разрушение высокопрочной стали, является мартенситный пакет, уменьшение размеров зерна аустенита и соответственно размеров мартенситных кристаллов и пакетов сопровождается одновременным повышением прочности, пластичности и сопротивления хрупкому разрушению.

Влияние исходной структуры стали можно проследить на примере высокоуглеродистых инструментальных и подшипниковых сталей. Наличие в исходной структуре стали ШХ15 однородного мелкопластинчатого перлита приводит к образованию в процессе закалки бесструктурного мартенсита с грубым строением. При этом возможно сохранение карбидной сетки при ее наличии до закалки.

Влияние *скорости охлаждения* тесно связано с мартенситным превращением в сталях при закалке. Превращение аустенита в мартенсит заключается только в изменении решетки твердого раствора. Оно происходит без изменения концентрации твердого раствора и является бездиффузионным. Сохраняется также строгая кристаллометрическая связь между решетками мартенсита и исходного аустенита. Превращение связано с незначительным смещением атомов железа (не более одного межатомного расстояния) без обмена их местами, причем атомы углерода, находящиеся в октаэдрических порах гранцентрированной решетки аустенита, попадают в октаэдрические поры объемноцентрированной тетрагональной решетки мартенсита.

Такой закономерный сдвиговый характер перестройки атомов вызывает по-

явление больших упругих деформаций при росте мартенситных кристаллов. Вследствие малых величин смещения атомов (порядка 0,01 нм) при сохранении когерентности решеток аустенита и мартенсита время образования мартенситных кристаллов очень мало и в зависимости от размеров кристаллов изменяется в пределах $(0,5 \dots 5,7)10^{-7}$ с, при этом скорость роста кристаллов может достигать 1 км/с. Рост кристалла мартенсита прекращается вследствие достижения напряжениями при упругих деформациях такого значения, при котором происходит их релаксация. При этом когерентное сопряжение решеток фаз на границе раздела нарушается и кристалл мартенсита обособляется, но сохраняется упругая деформация со стороны внешних по отношению к нему сил.

Превращение аустенита в мартенсит происходит при скоростях охлаждения, больших так называемой *критической скорости закалки*, и при переохлаждении стали в некотором интервале температур. Верхняя граница температурной области называется *точкой начала M_n* , а нижняя – *точкой конца M_k* мартенситного превращения. Положение этих точек определяется содержанием углерода и легирующих элементов в аустените. Выдержка при температуре $M_k < T < M_n$ вызывает стабилизацию аустенита, поэтому для дальнейшего протекания мартенситного превращения необходимо переохлаждение стали на несколько десятков градусов. Причинами стабилизации аустенита являются релаксация напряжений в аустените и возможное перераспределение углерода при остановке охлаждения.

Увеличение содержания углерода в стали сопровождается снижением мартенситных точек M_n и M_k . При содержании в стали углерода свыше 0,5 % мартенситное превращение при охлаждении до комнатной температуры не заканчивается и в стали сохраняется некоторое количество

остаточного аустенита. Объем остаточного аустенита растет с увеличением содержания углерода в стали и определяется положением мартенситной точки и ходом мартенситной кривой. Даже при охлаждении до температур ниже точки M_k в стали может сохраниться непревращенный аустенит.

Присутствие легирующих элементов, растворенных в аустените (за исключением алюминия и кобальта), понижает точки M_n и M_k и способствует увеличению количества остаточного аустенита, что приводит к некоторому снижению твердости и других механических свойств стали, а также ухудшению тепловых и магнитных характеристик.

Увеличение скорости закалки сверх критической приводит к небольшому возрастанию твердости в связи с подавлением явлений самоотпуска и практически не влияет на магнитные и электрические свойства сталей. Снижение скорости охлаждения ниже критической обуславливает образование промежуточных структур (сорбит, троостит, перлит), которые имеют разные механические, магнитные и электрические свойства.

Большое влияние на физические свойства закаленной и отпущенной стали оказывают *внутренние микронапряжения*, величина которых, особенно в закаленной стали, может быть значительной.

Рассмотренные выше факторы определяют структурное состояние, фазовый состав и, следовательно, прочностные, магнитные и электрические свойства стали после закалки. Условно по характеру зависимости магнитных свойств от температуры закалки можно выделить *три группы* сталей: первые две группы образуют доэвтектоидные и заэвтектоидные углеродистые, низколегированные конструкционные стали; к третьей группе можно отнести высоколегированные стали и стали специального назначения.

12.3.1. Дозвектоидные углеродистые и низколегированные конструкционные стали

Закалка на мартенсит существенно изменяет физические свойства сталей. Повышение плотности дислокаций, степени тетрагональности решетки мартенсита приводит к значительному увеличению внутренних микронапряжений и, как следствие этого, к росту эффективной магнитной анизотропии (магнитной жесткости). Это можно проследить на примере кривых намагничивания стали 34ХНЗМ (рис. 12.2), которые с повышением температуры закалки образцов становятся более пологими. Существенные изменения претерпевает магнитная проницаемость μ . При низких температурах аустенизации в процессе закалки в стали образуется небольшое количество мартенсита или он вообще отсутствует, поэтому магнитная проницаемость стали сохраняет свое высокое значение. С повышением температуры аустенизации магнитная проницаемость закаленной стали начинает снижаться.

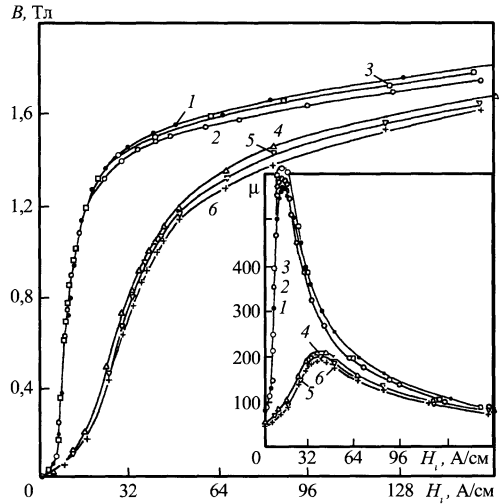


Рис. 12.2. Кривые намагничивания и проницаемости тороидальных образцов из стали 34ХНЗМ, закаленных от разных температур, °С:
 1 – 700; 2 – 725; 3 – 750; 4 – 800; 5 – 850;
 6 – 900 (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

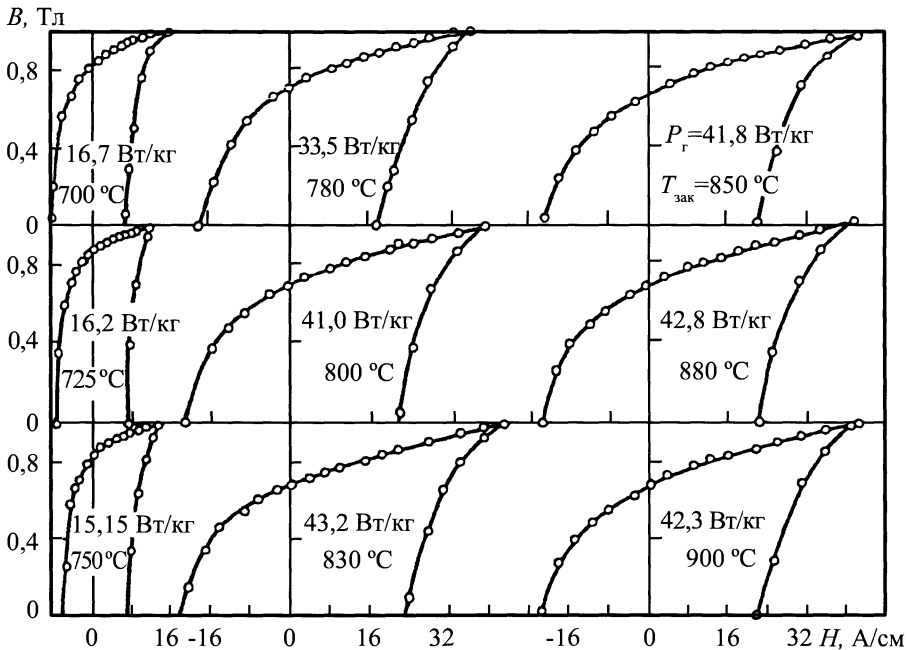


Рис. 12.3. Петли частного цикла магнитного гистерезиса ($B_{\max} = 1,0$ Тл) для тороидальных образцов из стали 34ХНЗМ, закаленных от разных температур

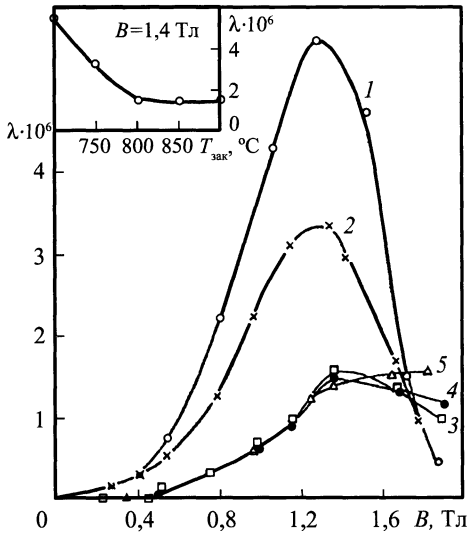


Рис. 12.4. Зависимости магнитострикции закаленных образцов из стали 34ХНЗМ от индукции и магнитострикции, измеренной при $B = 1,4$ Тл, от температуры закалки, °С:

1 – 700; 2 – 750; 3 – 800; 4 – 850; 5 – 900

Появление в стали мартенситной структуры сопровождается расширением петель магнитного гистерезиса (рис. 12.3); потери энергии на перемагничивание P_T и коэрцитивная сила возрастают более чем в 2 раза, а остаточная индукция снижается. Относительное изменение остаточной индукции меньше, чем коэрцитивной силы и потерь энергии на перемагничивание.

Характер изменения магнитострикции закаленной стали (рис. 12.4) аналогичен характеру изменения магнитострикции монокристаллов железа в направлении [110], но по абсолютному значению она меньше. Кривые магнитострикции имеют максимум, который соответствует примерно $0,7M_s$, в то время как для идеального поликристалла максимум магнитострикции соответствует $0,885M_s$. Причина смещения максимума не установлена, но, по-видимому, оно обусловлено наличием сильных внутренних напряжений, существованием областей микропластиче-

ских деформаций в стали, подвергнутой термической обработке, а также магнитным взаимодействием зерен или различных по магнитным свойствам участков ферромагнетика, что может привести к развитию процессов вращения задолго до окончания процессов смещения в ферромагнетике. Следует отметить, что величина магнитострикции, измеренной при одном значении индукции ($B = 1,4$ Тл), с появлением в структуре стали мартенсита снижается.

Закономерности изменения физических свойств в зависимости от температуры закалки сталей, содержащих различное количество углерода и других легирующих элементов, имеют много общего. В то же время при разработке методики контроля качества закалки изделий из стали конкретной марки необходимо учитывать существующие различия.

12.3.2. Конструкционные углеродистые качественные стали

Рис. 12.5 отражает закономерности изменения магнитных, электрических свойств и твердости сталей этой группы при вариации температуры закалки. Физико-механические свойства сталей в зависимости от температуры закалки наиболее существенно изменяются в интервале от 750 до 820 ... 850 °С. Границы данного интервала зависят от границ температурного интервала, определяемого точками A_{c1} и A_{c3} исследуемых сталей. Относительное изменение коэрцитивной силы, поля максимальной магнитной проницаемости $H_{\mu \max}$ и удельного электрического сопротивления ρ тем больше, чем выше содержание углерода в стали. Отсутствие изменений физико-механических свойств в интервале температур закалки 700 ... 750 °С объясняется тем, что при относительно быстром нагреве под закалку и небольшом времени выдержки, даже при температурах, несколько больших A_{c1} ,

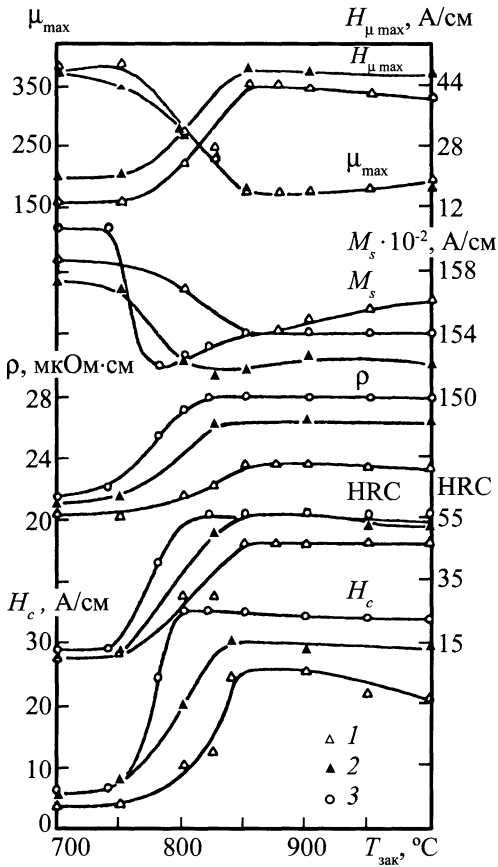


Рис. 12.5. Зависимости физико-механических характеристик сталей марок 30 (1), 45 (2) и 50РА (3) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20$ °С)

превращение перлита в аустенит не происходит и при охлаждении мартенсит не образуется.

С увеличением в структуре стали количества мартенсита твердость HRC возрастает. При температурах закалки 800 ... 850 °С твердость достигает максимального значения и далее не изменяется. Намагниченность насыщения отражает изменения, происходящие в фазовом составе стали. Снижение M_s (см. рис. 12.5) в интервале температур 750 ... 850 °С связано с появлением в структуре закаленной стали остаточного аустенита. Удельное электрическое сопротивление ρ с повышением

температуры закалки до 800 ... 850 °С растет, что связано с повышением содержания углерода в пересыщенном твердом растворе и появлением некоторого количества остаточного аустенита. При температуре выше 800 ... 850 °С значение ρ , как и HRC, практически не изменяется, поскольку при этих температурах закалки весь углерод переходит в твердый раствор. Присутствие постоянного для этих температур закалки количества остаточного аустенита не влияет на характер зависимости ρ от $T_{зак}$.

В закаленном состоянии наведенная эффективная магнитная анизотропия стали с мартенситной структурой оказывается существенно выше по сравнению с магнитной анизотропией стали в исходном состоянии. Значение константы эффективной анизотропии зависит от доли углерода в пересыщенном твердом растворе и уровня микронапряжений, поэтому в соответствии с теорией напряжений коэрцитивная сила закаленной стали будет расти с увеличением в ней количества углерода. Наибольшее относительное увеличение H_c наблюдается для небольших концентраций (до 0,4 %) углерода.

Кроме указанных факторов на значение коэрцитивной силы закаленной стали может влиять степень магнитного взаимодействия кристаллов мартенсита между собой, которая зависит от содержания остаточного аустенита в стали. Присутствие в этих сталях до 8 % остаточного аустенита, играющего роль неферромагнитных прослоек, затрудняет процессы намагничивания и перемагничивания закаленных сталей и тем самым приводит к росту абсолютного значения H_c . Увеличить коэрцитивную силу может также и неоднородность мартенсита.

Закалка сталей от температур 800 ... 850 °С и выше не изменяет магнитные свойства стали, поскольку практически весь углерод переходит в твердый раствор, параметры решетки мартенсита стабили-

зируются, внутренние напряжения и плотность дислокаций достигают максимальных значений и, следовательно, наведенная эффективная магнитная анизотропия становится постоянной. Последующий отпуск, предусмотренный технологией изготовления изделий, уменьшает различие физических свойств сталей, закаленных в диапазоне температур 700 ... 900 °С.

12.3.3. Конструкционные легированные стали

Хромистые стали. Наиболее широко используется в машиностроительной промышленности сталь 40Х. На ее примере рассмотрим закономерности изменения физико-механических свойств хромистых сталей при вариации температуры закалки. По сравнению с углеродистыми хромистые стали обладают более высокими прочностными свойствами. Физические свойства закаленных хромистых и углеродистых сталей изменяются аналогично (рис. 12.6, а). Присутствие в стали до 1 % хрома приводит к незначительному снижению намагниченности насыщения M_s и повышению удельного электрического сопротивления ρ . Вследствие хорошей растворимости хрома в железе значение коэрцитивной силы мало отличается от H_c углеродистых сталей. В зависимости от изменений значений точек A_{c1} и A_{c3} при вариациях содержания легирующих элементов в стали, а также времени нагрева и выдержки при аустенизации границы температурного интервала, в котором наблюдается наибольшее изменение физических свойств, могут смещаться. Отпуск при 430 °С уменьшает различие физических свойств закаленных и незакаленных образцов стали 40Х.

Хромокремнистые стали. Хромистая сталь, легированная кремнием, имеет большие значения ρ и меньшие значения M_s намагниченности насыщения (рис. 12.6, б), поскольку его присутствие в стали повышает содержание остаточного аустенита. После закалки сталей 38ХС и 40ХС на

мартенсит наблюдается увеличение коэрцитивной силы по сравнению со сталью 40Х, но закономерности изменения магнитных свойств хромистых и хромокремнистых сталей практически одинаковы.

Хромокремневольфрамовые стали в основном используются для изготовления ударного инструмента. Закономерности изменения физических свойств от температуры закалки для стали 50ХВС (рис. 12.6, в) качественно совпадают с закономерностями, наблюдаемыми для сталей 38ХС и 40ХС. Смещение интервала $A_{c1}-A_{c3}$ в область меньших температур сопровождается смещением области наиболее интенсивного изменения магнитных свойств в диапазон температур 780 ... 840 °С. В отличие от хромистой стали цементит в стали 50ХВС более легирован, что, по-видимому, приводит к некоторой задержке его растворения при аустенизации.

Растворение легированного цементита при температурах аустенизации выше 840 °С сопровождается повышением содержания в γ -фазе углерода и других легирующих элементов. В результате этого в стали после закалки увеличивается количество остаточного аустенита, о чем свидетельствует рост удельного электрического сопротивления при $T_{\text{зак}} = 850 \dots 1000$ °С. Низкотемпературный отпуск при 220 °С к существенному изменению закономерностей физических свойств не приводит.

Хромомолибденовые и хромоникелевые стали. Присутствие в хромистой стали молибдена может вызвать некоторое уменьшение намагниченности насыщения и несколько повысить магнитную жесткость стали в исходном состоянии. В целом закономерности изменения физико-механических свойств сталей 30ХЗМФ и 35ХМ (рис. 12.6, г) в зависимости от температуры закалки аналогичны закономерностям, наблюдаемым для хромистых сталей.

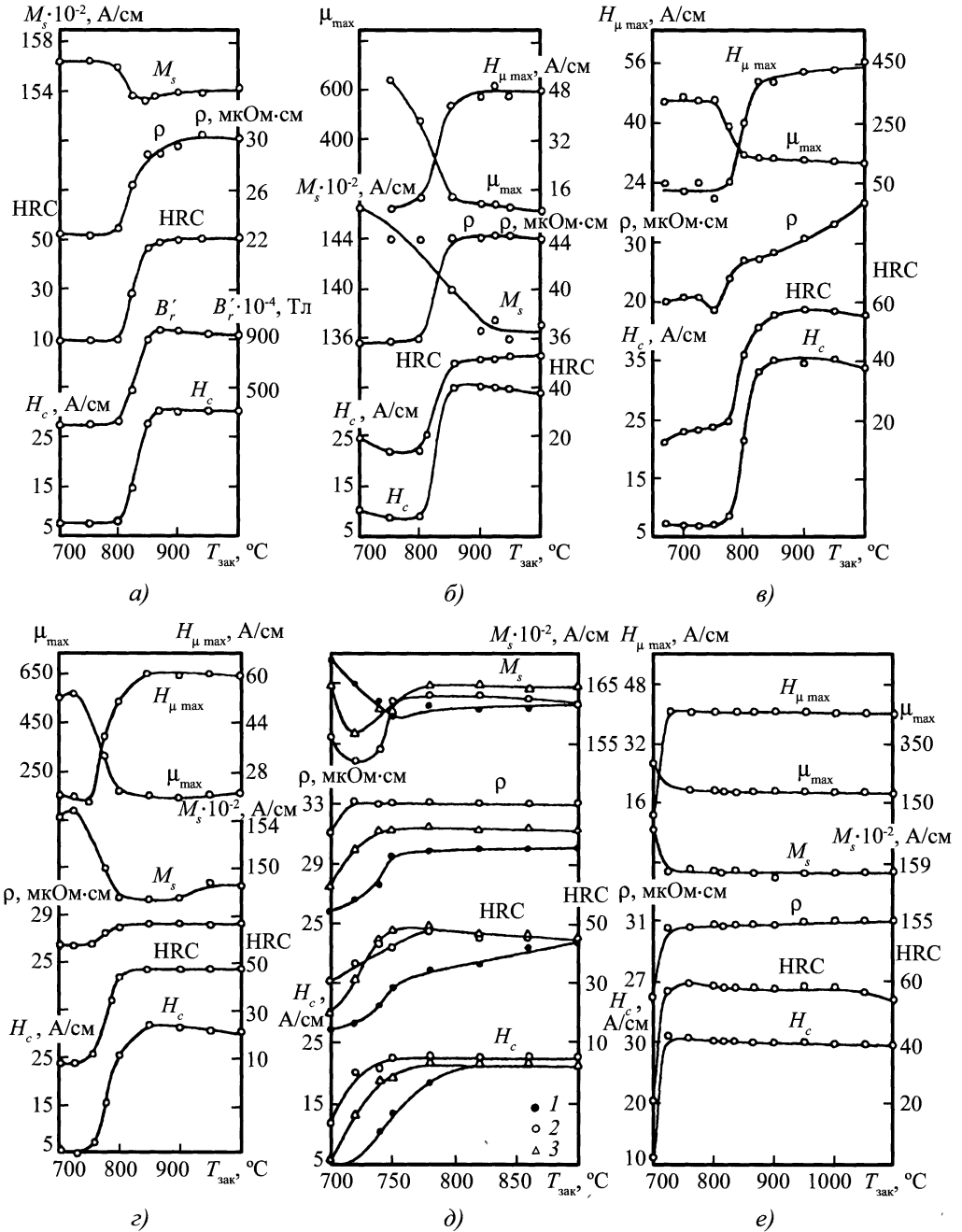


Рис. 12.6. Зависимости физико-механических характеристик различных сталей от температуры закалки:

a – 40X; *б* – 40XC; *в* – 50XBC; *г* – 35XM; *д* – 17XН2 (1), 17XН3МА (2), 20XН3А (3); *е* – 45XH (закалочная среда – масло при $t = 20$ (а–д) и (40 ± 5) °C (е))

Хромоникелевые, а также хромомолибденовые стали с содержанием углерода до 0,2 % находят широкое применение для изготовления изделий, подвергаемых поверхностному упрочнению путем цементации. Для сталей 20ХН3А, 17Х3МА (рис. 12.6, д) изменение физико-механических свойств происходит в относительно узком диапазоне температур: $T_{\text{зак}} = 700 \dots 750 \text{ }^\circ\text{C}$, поскольку интервал $A_{c1}-A_{c3}$ примерно соответствует $720 \dots 770 \text{ }^\circ\text{C}$. У стали 17ХН2 (рис. 12.6, д) интервал $A_{c1}-A_{c3}$ шире ($720 \dots 840 \text{ }^\circ\text{C}$), поэтому диапазон изменения коэрцитивной силы и твердости расширяется до температуры $820 \text{ }^\circ\text{C}$. Отпуск при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$ на 5 ... 10 % снижает значения H_c и ρ , не изменяя значений HRC и M_s .

Для стали 45ХН (рис. 12.6, е) интервал $A_{c1}-A_{c3}$ очень узок ($740 \dots 755 \text{ }^\circ\text{C}$), поэтому все исследованные физико-механические свойства интенсивно меняются в интервале $T_{\text{зак}} = 700 \dots 740 \text{ }^\circ\text{C}$, а далее остаются постоянными. Отпуск на $570 \text{ }^\circ\text{C}$ образцов, закаленных от различных температур, приводит к сглаживанию различия между закаленным и незакаленным состояниями стали.

Хромокремнемарганцевые стали широко распространены в машиностроении, поэтому их физические свойства были неоднократно исследованы в целях разработки неразрушающих методов контроля качества термической обработки. Характер изменения физических свойств сталей 25ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА (рис. 12.7), а также стали 20ХГСНМ практически такой же, как и для хромокремнистых сталей. Следует отметить, что в сталях с небольшим содержанием углерода (20ХГСНМ, 25ХГСА) область температур, где происходит наибольшее изменение физических свойств, несколько шире по сравнению со сталью 35ХГСА, содержащей большее количество углерода. Увеличение содержания углерода сопровождается также некоторым повышением коэрцитивной силы, удельного электрического сопро-

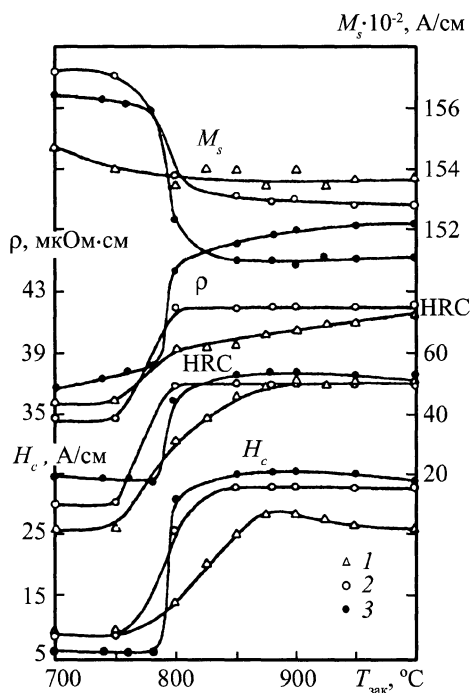


Рис. 12.7. Зависимости физико-механических характеристик сталей 25ХГСА (1), 30ХГСА (2), 35ХГСА (3) от температуры закалки (закалочная среда — масло при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

тивления, твердости и снижением намагниченности насыщения.

Хромоникельмолибденовые стали с содержанием углерода до 0,2 % и стали, в которых молибден заменен вольфрамом, могут закаливаться как в масле, так и на воздухе, что приводит к некоторому различию физических свойств. Так, у стали 18ХНМА, закаленной в масле, кривые коэрцитивной силы, поля максимальной магнитной проницаемости, твердости и индукции насыщения идут выше. Отпуск на $560 \text{ }^\circ\text{C}$ выравнивает различие физических свойств закаленной и незакаленной стали, однако для образцов, закаленных на воздухе, характерно сохранение большей магнитной жесткости.

В стали 18Х2Н4ВА, в которой молибден заменен вольфрамом, наблюдается некоторая особенность в характере изме-

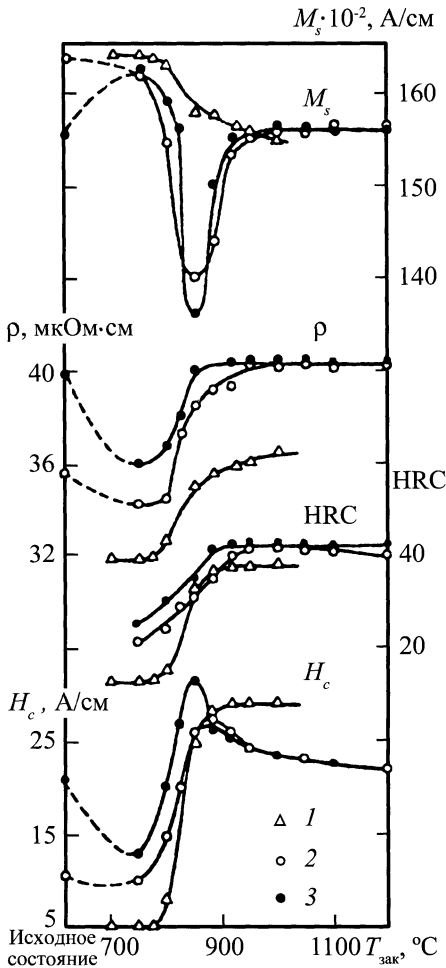


Рис. 12.8. Зависимости физико-механических характеристик сталей 12X2HВФА (1) и 18X2H4BA с исходными структурами:

точечный и зернистый перлит + мелкий феррит (2) и зернистый перлит + мелкий феррит (3) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

нения намагниченности насыщения (рис. 12.8), заключающаяся в появлении минимума M_s в области температур 825 ... 875 °C. Исследования показали, что в образцах, закаленных от 850 °C на воздухе, содержится до 17 % остаточного аустенита, который устойчив против охлаждения до температур жидкого азота (сохраняется до 14 %). При закалке на воздухе в стали

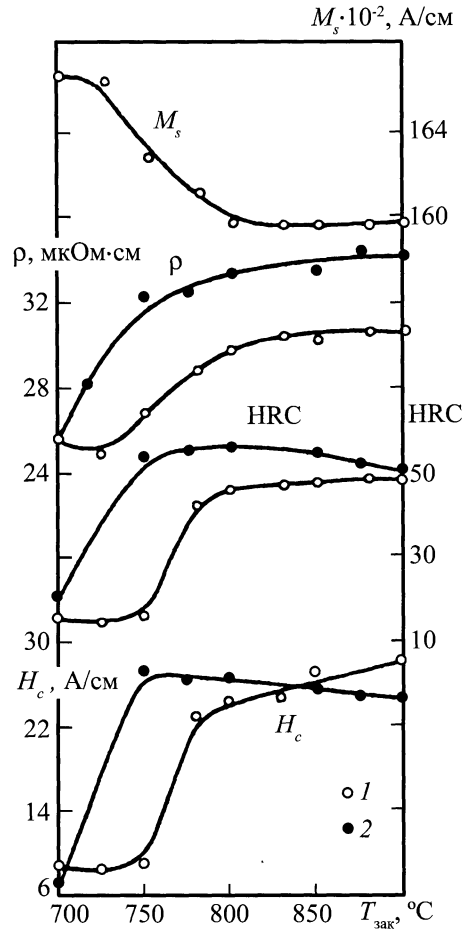


Рис. 12.9. Зависимости физико-механических характеристик сталей 34XНЗМ (1) и 40XН2М (2) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

содержится остаточного аустенита на 2 ... 4 % больше, чем при закалке в масле. Небольшой минимум B_s при $T_{\text{zak}} = 780 \dots 850^\circ\text{C}$ наблюдается и для стали 18XНМА (причины образования минимума M_s обсуждаются ниже). Различия в исходной структуре стали 18X2H4BA оказывают заметное влияние на структурно-чувствительные магнитные характеристики при $T_{\text{zak}} = 700 \dots 875^\circ\text{C}$.

Стали 34XНЗМ и 40XН2М (рис. 12.9) по закономерностям изменения магнитных, электрических свойств и твердости

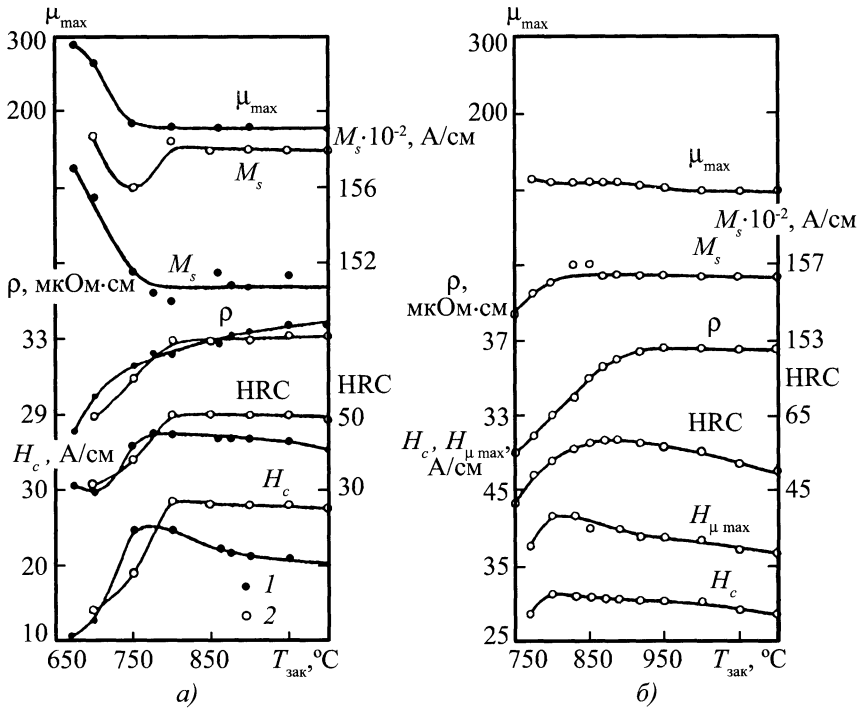


Рис. 12.10. Зависимости физико-механических характеристик сталей от температуры закалки:

a – 20XFNА (1) и 30XН2МФА (2); *б* – 45XНФМА (закалочная среда – масло при $t = 20$ (а) и (30 ± 2) °C (б))

от температуры закалки близки к сталям 35ХМ и 45ХН. Представляет интерес изменение потерь энергии на перемагничивание в зависимости от температуры закалки. В слабых магнитных полях ($B_{\max} = 0,05$ Тл) потери энергии на перемагничивание с увеличением температуры закалки убывают, в средних ($B_{\max} = 1,0$ Тл) имеют закономерности, аналогичные закономерностям изменения H_c от $T_{\text{зак}}$; в сильных магнитных полях ($B_{\max} = 1,9$ Тл) они опять убывают.

Хромоникельмолибденованадиевые и хромоникельванадиевые стали. Стали с небольшим содержанием углерода, например 20ХНФА, используют для изготовления изделий, которые поверхностно упрочняют путем цементации. Сталь обладает небольшой прокаливаемостью, и из нее изготавливают небольшие по размерам

изделия. Наиболее сильные изменения физические свойства претерпевают при $T_{\text{зак}} = 650 \dots 750$ °C (рис. 12.10, *a*). Последующий отпуск при 590 °C несколько сглаживает различие свойств в зависимости от температуры закалки, но для максимальной магнитной проницаемости, ударной вязкости и твердости сохраняется довольно значительное их изменение.

Характер изменения магнитных, электрических свойств и твердости стали 30ХН2МФА в зависимости от температуры закалки не имеет существенных отличий от закономерностей, присущих конструкционным легированным сталям, рассмотренным ранее. Основные изменения физических характеристик наблюдаются в области $T_{\text{зак}} = 700 \dots 800$ °C. Минимум на кривых $M_s(T_{\text{зак}})$ при 750 °C (см. рис. 12.10, *a*) свидетельствует о том, что образовавшийся

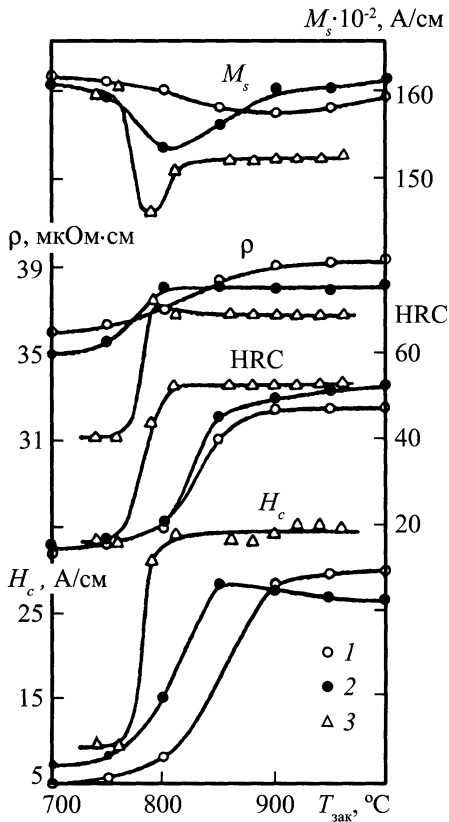


Рис. 12.11. Зависимости физико-механических характеристик сталей 18СГМ (1), 23СГМ (2) и 35СГМ (3) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20$ (1, 2) и 35 °C (3))

аустенит устойчив при мартенситном превращении. Высокотемпературный отпуск при 680 °C приводит к выравниванию свойств закаленного и незакаленного состояний.

Кривые изменения магнитных и электрических свойств, а также твердости стали 45ХНМФА приведены на рис. 12.10, б, из которого следует, что в основном физические характеристик, достигнув при $T_{\text{zak}} = 780 \dots 800$ °C некоторого значения, далее изменяются незначительно. Такие параметры, как коэрцитивная сила, поле максимальной проницаемости и твердость, при нагреве до $T_{\text{zak}} = 800$ °C возрастают, а затем незначительно уменьшаются. Кривые изменения ρ продолжают

свой рост до $T_{\text{zak}} = 950$ °C, что свидетельствует о довольно широкой температурной области растворения карбидов ванадия. Для M_s в области $T_{\text{zak}} = 740 \dots 780$ °C может наблюдаться минимум, глубина которого зависит от исходной структуры и скорости охлаждения при закалке. Для образцов из стали 45ХНМФА характерно сильное влияние исходной структуры на физические свойства закаленной стали.

Кремнемарганцевомолибденовые стали. Для стали 18СГМ (рис. 12.11) характерна широкая область изменения физических свойств в диапазоне $T_{\text{zak}} = 750 \dots 900$ °C, что обусловлено большим интервалом температур между критическими точками A_{c1} и A_{c3} . С повышением содержания углерода в сталях 23СГМ и 35СГМ интервал критических температур сужается, поэтому сужается и область, в которой происходят основные изменения физических свойств. Для указанных сталей характерно существование минимума намагниченности насыщения на кривых M_s , о котором упоминалось ранее для других сталей. Местоположение минимума зависит от содержания углерода в стали. Для стали 18СГМ он приходится на $T_{\text{zak}} = 900$ °C, для сталей 23СГМ и 35СГМ – на 800 °C. Для стали 35СГМ, с наибольшим количеством аустенита, в области температур образования минимума M_s наблюдаются уменьшение термоЭДС и небольшое возрастание значения ρ .

Для *хромалюминиевых и хромалюминиевых с молибденом сталей*, например для стали 38Х2МЮА, изменение физических свойств характерно до температуры $T_{\text{zak}} = 860$ °C, превышение которой не отражается на изменениях свойств, что свидетельствует о нечувствительности этой стали к перегреву.

12.3.4. Рессорно-пружинные стали

Рессорно-пружинные стали характеризуются высоким временным сопротивлением разрыву в сочетании с высоким пределом текучести. По химическому составу эти стали делятся на две группы –

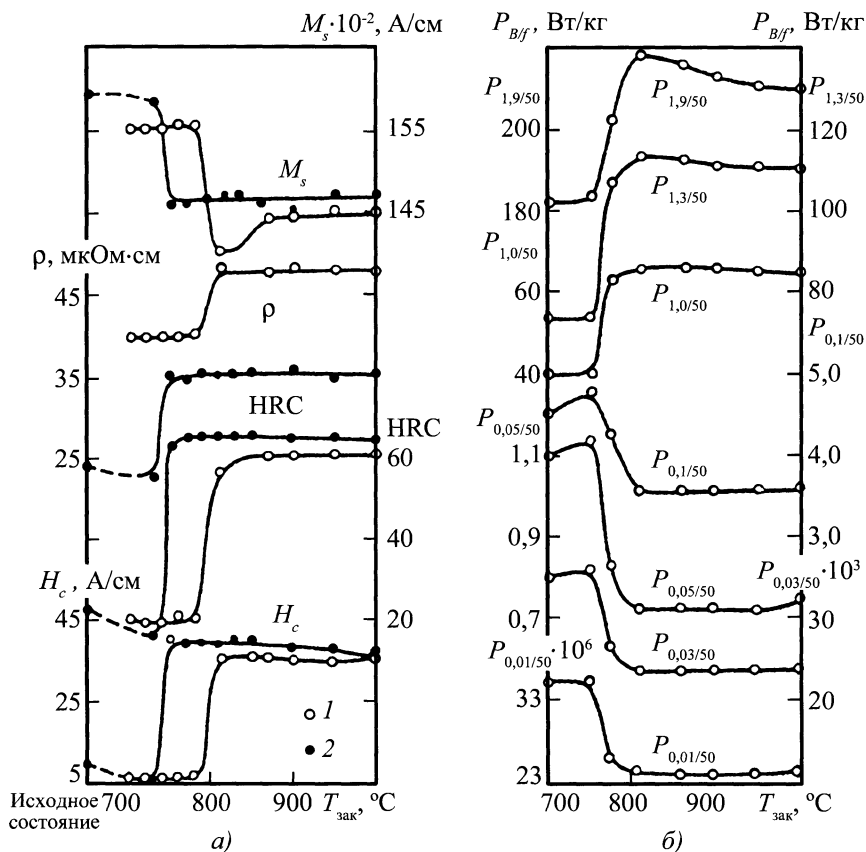


Рис. 12.12. Зависимости физико-механических характеристик сталей 60С2А (1) и 65Г (2) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20$ (1) и 30 °С (2))

углеродистые и легированные. В углеродистых сталях с содержанием углерода 0,65 ... 0,85 % после окончательной термической обработки $\sigma_b \leq 1150$ МПа, а $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа. В легированных рессорно-пружинных сталях с повышением содержания углерода σ_b достигает 1900 МПа, а $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа.

Марганцевые стали. Прочностные свойства и показатели пластичности марганцевых сталей такие же, как и углеродистых сталей, используемых для изготовления пружин, но легирование марганцем позволяет получать более высокую прокаливаемость. Небольшое содержание марганца в этих сталях незначительно влияет

на физико-механические свойства, поэтому изученные закономерности их изменения от температуры закалки (рис. 12.12, а) аналогичны наблюдаемым для доэвтектоидных углеродистых сталей.

Кремнистые стали. Содержание кремния в стали повышает временное сопротивление разрыву и в большей степени предел текучести. Недостатком этих сталей является их повышенная склонность к обезуглероживанию. Максимальное изменение их физических свойств соответствует $T_{\text{зак}} = 780 \dots 820$ °С (см. рис. 12.12, а). При $T_{\text{зак}} = 800 \dots 820$ °С для намагниченности насыщения наблюдается минимум, обусловленный стабилизацией аустенита

при мартенситном превращении. В стали 60С2А содержится большее количество остаточного аустенита по сравнению со сталью 65Г. Повышение температуры закалки ($T_{\text{зак}} = 820 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$) не приводит к существенному изменению физико-механических свойств. Как и в случае стали 34ХНЗМ, наблюдается различный характер изменения потерь энергии на перемагничивание в слабых, средних и сильных магнитных полях (рис. 12.12, б).

Характер изменения физических свойств хромомарганцевой стали 50ХГ практически такой же, как и у марганцевой стали 65Г (см. рис. 12.12, а).

12.3.5. Заэвтектоидные углеродистые и легированные стали

Углеродистые стали. Инструментальные высококачественные углеродистые стали У7А–У13А и качественные У7–У13 применяют в основном для изготовления инструмента и простых штампов.

При $T_{\text{зак}} = 700 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ для заэвтектоидных и эвтектоидных сталей (рис. 2.13, а) характерно такое же поведение коэрцитивной силы, электрического сопротивления, поля максимальной магнитной проницаемости, потерь энергии на перемагничивание, измеренных при средних амплитудах индукции ($B = 0,3 \dots 1,0 \text{ Тл}$), как и для доэвтектоидных сталей. Увеличение $T_{\text{зак}}$ эвтектоидной стали У8 выше $850 \text{ }^\circ\text{C}$ к изменению H_c , μ_{max} , M_s и ρ не приводит, поскольку при этих температурах не наблюдается существенных структурных изменений и фазовых превращений.

В заэвтектоидных сталях У9А, У10 и У12 закалка от температур выше $800 \text{ }^\circ\text{C}$ вызывает неоднозначное изменение магнитных характеристик H_c , $P_{B/f}$, $H_{\mu \text{max}}$. При $T_{\text{зак}} = 800 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ указанные магнитные свойства достигают максимального значения, а потом убывают. Значения максимума H_c зависит от содержания углерода в стали, а его появление обусловлено изменениями относительного объема и дис-

персности включений остаточного аустенита и избыточных карбидов. При определенном содержании остаточного аустенита и избыточных, не растворившихся при нагреве карбидов коэрцитивная сила достигает максимального значения в соответствии с модельными представлениями о перемагничивании ферромагнетиков, имеющих включения "критического" размера. Изменение размеров игл мартенсита при варьировании режима закалки практически не влияет на значение коэрцитивной силы. Ее максимум соответствует примерно 12 % содержания остаточного аустенита в стали.

Характер изменения величин ρ и M_s в зависимости от $T_{\text{зак}}$ определяется количеством углерода в стали. Так, для эвтектоидной стали У8 (см. рис. 12.13, а) намагниченность насыщения снижается при $T_{\text{зак}} = 700 \dots 825 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее практически не изменяется. В сталях У9А, У10 и У12 с повышением температуры закалки намагниченность насыщения убывает (для У9А, У10 до $T_{\text{зак}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, для У12 до $950 \text{ }^\circ\text{C}$). Снижение M_s при увеличении $T_{\text{зак}}$ объясняется тем, что с повышением в сталях содержания углерода образуется большее количество остаточного аустенита вследствие снижения точек начала мартенситного превращения. Значение ρ , которое в большей степени зависит от содержания в стали остаточного аустенита, с повышением температуры закалки растет. В сталях У8, У10 (см. рис. 12.13, а) и У9А оно возрастает до $T_{\text{зак}} = 825 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее практически не меняется, а у стали У12 значение ρ увеличивается во всем интервале $T_{\text{зак}}$.

Введение в сталь легирующих элементов приводит к повышению прочностных свойств, износоустойчивости и устойчивости сталей к самоотпуску в процессе эксплуатации. На примере нескольких марок рассмотрим закономерности изменения физических свойств легированных сталей при закалке от различных температур.

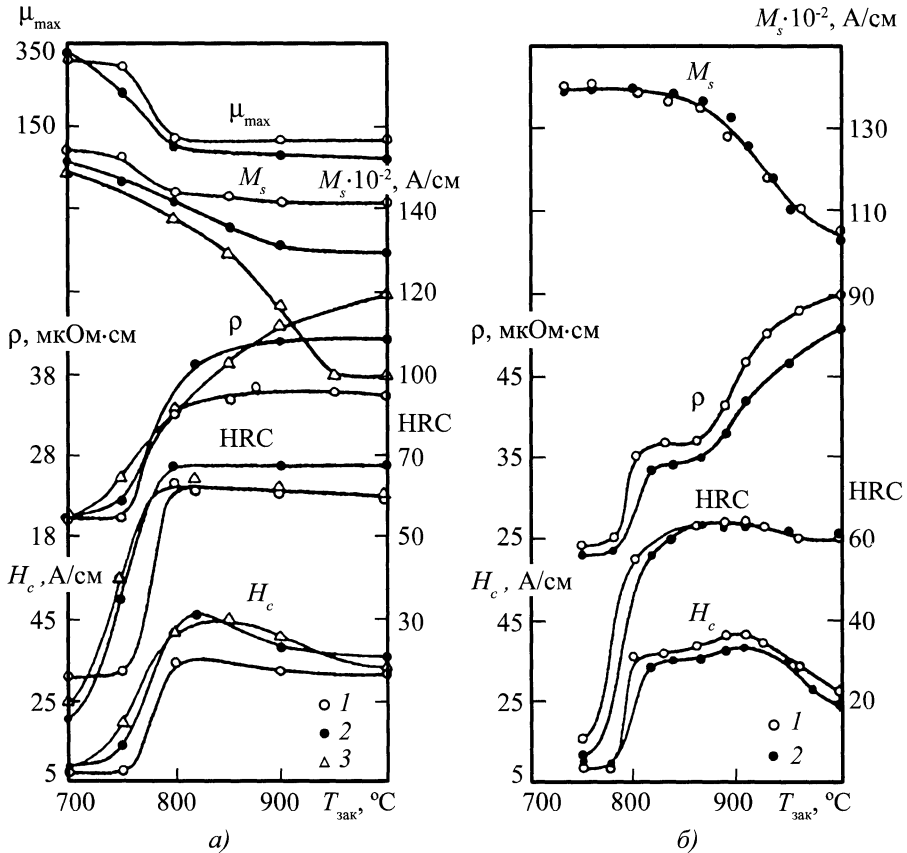


Рис. 12.13. Зависимости физико-механических характеристик углеродистых сталей от температуры закалки:
 а – У8 (1), У10 (2), У12 (3); б – 9Х (1), 9Х2 (2) (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

Легированные углеродистые стали. Из сталей 9Х и 9Х2 изготовляют валки холодной прокатки. Введение в сталь хрома увеличивает прокаливаемость стали и придает ей большую твердость. Характер изменения магнитных свойств сталей 9Х, 9Х2 в зависимости от температуры закалки (см. рис. 12.13, б) имеет небольшие отличия от характера изменения магнитных свойств заэвтектоидных сталей (см., например, сталь У12 на рис. 12.13, а). Максимум H_c в зависимости от $T_{\text{зак}}$ выражен не так явно, как в заэвтектоидных углеродистых сталях, и смещен в область больших температур закалки. Некоторое снижение твердости стали при $T_{\text{зак}} > 900^\circ\text{C}$

вызвано растворением карбидов хрома и увеличением количества остаточного аустенита. Низкотемпературный отпуск при 140°C к существенным изменениям физических свойств не приводит.

Хромистые стали применяют в машиностроении для производства подшипников и в качестве инструментальных сталей. Для производства подшипников предусмотрено использовать стали ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. Сталь ШХ15СГ обладает наименьшей критической скоростью охлаждения и наибольшей прокаливаемостью, поэтому ее используют для изготовления массивных изделий.

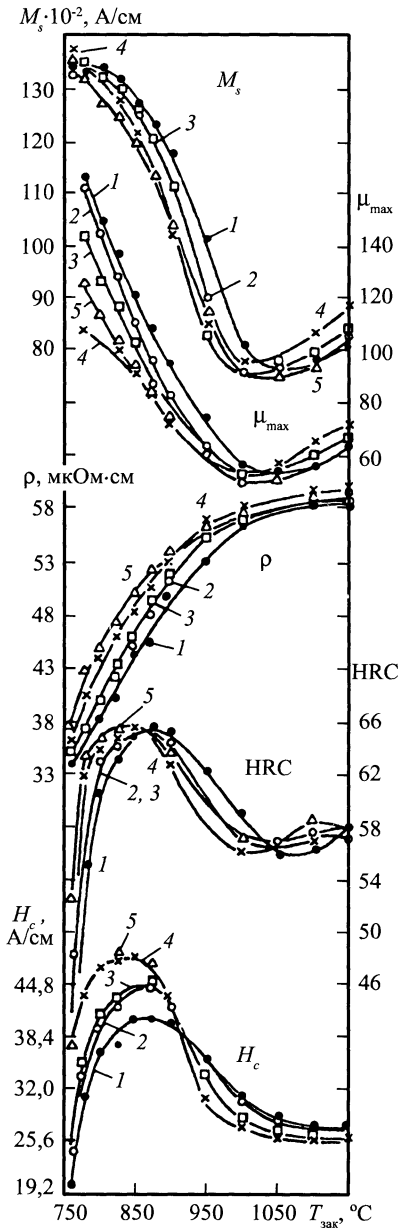


Рис. 12.14. Зависимости физико-механических характеристик стали ШХ15СГ от температуры закалки для разных исходных структур:

1 – крупнозернистый перлит; 2 – зернистый перлит; 3 – зернистый перлит с карбидной сеткой; 4 – грубопластинчатый перлит с карбидной сеткой; 5 – пластинчатый перлит (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

В характере зависимости магнитных свойств подшипниковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ (рис. 12.14) от температуры закалки много общего с поведением рассматриваемых свойств при закалке углеродистых заэвтектидных сталей. Поскольку в сталях ШХ15 и ШХ15СГ присутствует хром и марганец, температура начала мартенситного превращения зависит не только от содержания углерода в аустените, но и от содержания легирующих элементов. Увеличение их содержания в твердом γ -растворе по мере повышения температуры аустенизации снижает точку начала мартенситного превращения, и при $T_{\text{зак}} = 980^\circ\text{C}$ для стали ШХ15 она соответствует 110°C . Дальнейшее увеличение температуры аустенизации на ход мартенситного превращения не влияет, поскольку состав аустенита становится тождественным марочному и далее не изменяется. Снижение точек M_n и M_c сопровождается увеличением в стали остаточного аустенита, количество которого непрерывно растет при нагреве под закалку до 1000°C и далее не меняется.

Физико-механические свойства закаленных сталей ШХ15 и ШХ15СГ определяются присутствием в стали таких структур, как мартенсит, избыточные карбиды и остаточный аустенит. Появление в стали мартенсита приводит к повышению твердости, коэрцитивной силы, поля максимальной магнитной проницаемости, удельного электросопротивления и к снижению остаточной индукции, максимальной индукции, измеренной в поле 560 A/cm , начальной и максимальной магнитных проницаемостей. Увеличение содержания остаточного аустенита влияет на процессы перемагничивания закаленной стали, так как коэрцитивная сила и поле максимальной магнитной проницаемости при определенных его количествах и степени дисперсности, в соответствии с теорией включений, достигают максимального значения и далее уменьшаются (см. рис. 12.14). Увеличение количества оста-

точного аустенита сопровождается снижением твердости, причем для стали ШХ15СГ твердость, коэрцитивная сила, а также поле максимальной магнитной проницаемости при нагреве снижаются гораздо больше, чем для стали ШХ15, так как в этой стали содержится большее количество остаточного аустенита.

Следует отметить необычный ход намагниченности насыщения и максимальной магнитной проницаемости в области сильного перегрева при закалке: выше 1000 °С значения M_s и μ_{\max} возрастают, что свидетельствует о протекании фазовых превращений, возможно связанных с уменьшением количества остаточного аустенита в стали. Удельное электрическое сопротивление растет по мере увеличения $T_{\text{зак}}$ (см. рис. 12.14). Предполагаемое уменьшение количества остаточного аустенита в стали при высоких температурах закалки практически не оказывает влияния на значение ρ .

Низкотемпературный отпуск при 150 °С, не меняя характера зависимости физических свойств от температуры закалки, вызывает снижение коэрцитивной силы и повышение максимальной магнитной проницаемости на 10 ... 15 %. Намагниченность насыщения и твердость изменяются мало. Физико-механические свойства закаленной стали во многом зависят от исходной структуры металла перед закалкой, особенно от состояния карбидной фазы, которая определяет размеры зерна при аустенизации и степень насыщения твердого раствора углеродом и легирующими элементами. По условиям поставки горяче- и холоднокатаные стали ШХ15 и ШХ15СГ должны иметь структуру однородного мелкодисперсного перлита, которой соответствует твердость НВ 179 ... 207 (для ШХ15СГ НВ 179 ... 217).

При исходной структуре мелкозернистого перлита закаленная сталь приобретает высокие упругие и пластические свойства в сочетании с относительно большой вязкостью. Исследованиями ус-

тановлено, что исходная структура влияет на магнитные, электрические и механические свойства сталей ШХ15 и ШХ15СГ до закалки (табл. 12.1) и после нее (см. рис. 12.14). Для всех исходных структур максимум H_c наблюдается в интервале нормальных температур закалки, но он возрастает по абсолютному значению примерно на 20 % и смещается в сторону более низких температур закалки при наличии в исходной структуре стали пластинчатого перлита. Коэрцитивная сила и максимальная магнитная проницаемость наиболее чувствительны к исходной структуре при недогреве.

Таким образом, магнитные и механические свойства сталей зависят от растворимости карбидных частиц разной формы. При одних и тех же условиях нагрева пластинчатые карбиды, обладая большой площадью поверхности, растворяются быстрее, затем растворяются мелкозернистые и только потом крупнозернистые карбиды. Присутствие в стали участков мелкопластинчатого перлита приводит к появлению на их месте после закалки участков игольчатого мартенсита, что будет соответствовать структурам перегрева. И наоборот, наличие в исходной структуре крупнозернистого перлита приведет к образованию после закалки троостита (недогрев при закалке).

Помимо исходной структуры и температуры аустенизации на магнитные, электрические свойства и твердость влияет также время выдержки при аустенизации. Увеличение длительности аустенизации эквивалентно повышению температуры аустенизации, что оказывает дополнительное влияние на многие физические свойства. Например, при увеличении времени аустенизации максимальные значения H_c и HRC смещаются в область более низких температур закалки, а при $T_{\text{зак}} = 750 \dots 1000$ °С увеличивается количество остаточного аустенита.

12.1. Физические свойства сталей ШХ15 (в числителе) и ШХ15СГ (в знаменателе) в исходном состоянии

Микроструктура	НВ	H_c , А/см	μ_{\max}	$M_s \cdot 10^{-2}$, А/см	ρ , мкОм · см ($t = 20^\circ\text{C}$)	ТермоЭДС, усл. ед.
Крупнозернистый неоднородный перлит	176 ± 5	$7,44 \pm 0,56$	565 ± 30	$14\ 050 \pm 50$	$20,9 \pm 0,3$	117 ± 3
	187 ± 5	$6,88 \pm 0,64$	565 ± 35	$13\ 790 \pm 40$	$27,6 \pm 0,4$	45 ± 3
Зернистый однородный перлит	191 ± 3	$8,8 \pm 0,16$	530 ± 10	$14\ 050 \pm 50$	$20,9 \pm 0,2$	117 ± 3
	202 ± 3	$8,8 \pm 0,24$	550 ± 10	$13\ 800 \pm 30$	$27,6 \pm 0,33$	44 ± 2
Зернистый перлит с карбидной сеткой	194 ± 6	$9,0 \pm 0,66$	420 ± 10	$14\ 100 \pm 40$	$21,2 \pm 0,2$	107 ± 3
	205 ± 3	$9,36 \pm 0,16$	420 ± 10	$13\ 830 \pm 30$	$27,8 \pm 0,3$	39 ± 2
Грубопластинчатый перлит с карбидной сеткой	268 ± 5	$11,68 \pm 0,32$	220 ± 5	$14\ 220 \pm 60$	$22,8 \pm 0,2$	85 ± 15
	255 ± 10	$16,64 \pm 0,4$	245 ± 10	$14\ 070 \pm 100$	$28,8 \pm 0,3$	35 ± 3
Пластинчатый перлит	—	—	—	—	—	—
	260 ± 10	$15,76 \pm 0,56$	235 ± 5	$14\ 000 \pm 50$	$29,5 \pm 0,5$	45 ± 3

12.3.6. Высоколегированные стали

Механизм мартенситного превращения аустенита в легированных сталях тот же, что и в углеродистых, однако кинетика превращений в них различается, и в некоторых случаях существенно. Легирование стали элементами, не образующими карбидов, оказывает количественное влияние на процессы превращения. Они могут ускорять его (Со) или замедлять (Ni, Cu, Al). Карбидообразующие легирующие элементы, кроме того, вносят качественные изменения в кинетику изотермического превращения. Большинство легирующих элементов повышает устойчивость аустенита и снижает точку начала мартенситного превращения (за исключением Со и Al). В легированных сталях характер изменения магнитных свойств от температуры закалки во многом определяется тем, какими элементами и в каком количестве легирована сталь. Понижение температурного

интервала мартенситного превращения в зависимости от степени легирования влияет на количество остаточного аустенита в сталях.

Хромистые стали. Наиболее распространенными хромистыми сталями данного класса являются стали типа Х13. На примере стали 20Х13 (рис. 12.15) рассмотрим изменение физико-механических свойств при вариации температуры закалки. Оптимальная температура закалки – 1010 ... 1015 °С. При этих значениях $T_{\text{зак}}$ и последующем отпуске сталь приобретает наилучшие механические свойства. Легирование стали хромом сопровождается увеличением его содержания в твердом γ -растворе при повышении температуры аустенизации, что, в свою очередь, приводит к непрерывному росту количества остаточного аустенита. При этом намагниченность насыщения уменьшается, а удельное электрическое сопротивление

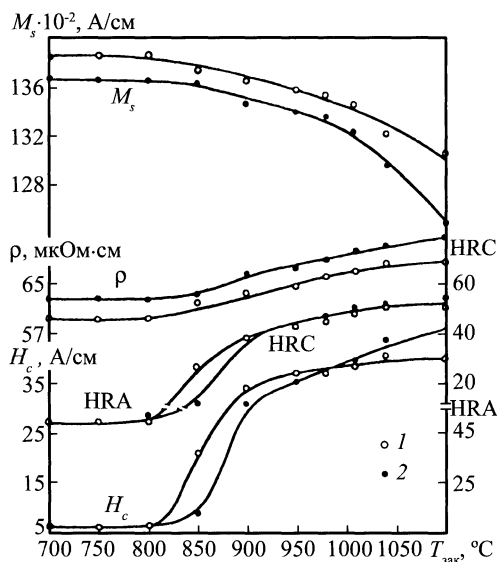


Рис. 12.15. Зависимости физико-механических характеристик стали 20X13 двух плавов от температуры закали: 1 – 0,21 % С, 0,48 % Si, 0,26 % Mn, 12,8 % Cr, 0,21 % Ni, 0,009 % S, 0,026 % P; 2 – 0,23 % С, 0,68 % Si, 0,29 % Mn; 13,1 % Cr, 0,15 % Ni, 0,015 % S, 0,020 % P (закалочная среда – масло при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

растет. Кривая коэрцитивной силы изменяется эквидистантно кривой твердости.

Стали X12Ф1 и X12М (рис. 12.16) используют преимущественно для изготовления штампового инструмента, работающего в условиях тяжелого нагружения. Присутствие большого количества избыточной карбидной фазы делает эти стали высокоизносоустойчивыми. Высокохромистые стали (12 % Cr), содержащие 1,0 ... 1,2 % С, представляют собой ледебуритные сплавы, содержащие карбиды $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ и $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$. Молибден и вольфрам способствуют образованию карбида Me_{23}C_6 вместо карбида Me_7C_3 .

Повышение температуры закалики с 900 до 1200 °С сопровождается уменьшением количества избыточных карбидов с 9 до 1 %. Первыми переходят в твердый γ -раствор (согласно диаграмме железо-хром-углерод) карбиды типа Me_7C_3 , а затем карбиды типа Me_{23}C_6 . При этом кон-

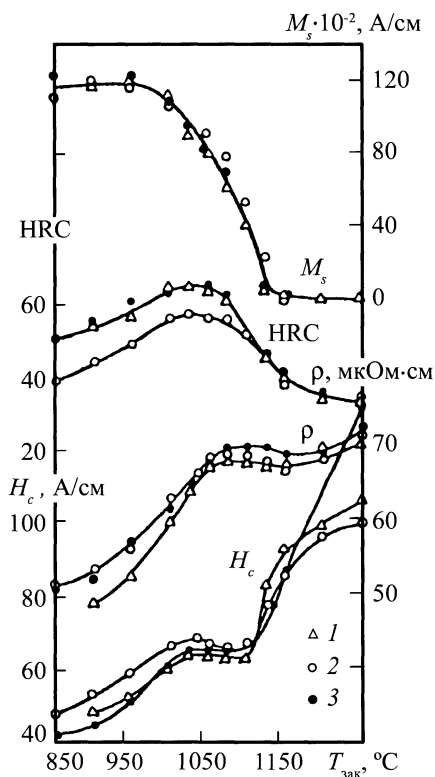


Рис. 12.16. Зависимости физико-механических характеристик сталей X12М (1) и X12Ф1 (2) от температуры закалики на воздухе (1, 2) и в масле при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3)

центрации углерода и хрома в твердом γ -растворе возрастают от 0,2 и 3,0 до 0,9 и 11 % соответственно. Эти процессы сопровождаются повышением H_c , ρ и HRC в интервале $T_{\text{zak}} = 850 \dots 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При $T_{\text{zak}} > 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в структуре стали появляется остаточный аустенит. Увеличение растворимости карбидов и содержания хрома в твердом растворе с повышением температуры закалики снижает точки M_n и M_k . Так, для $T_{\text{zak}} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ $M_n = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $M_k = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для $T_{\text{zak}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $M_n = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $M_k = -170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому количество остаточного аустенита в сталях X12Ф1 и X12М (при охлаждении в масле комнатной температуры) возрастает от 10 ... 12 до 98 % (см. рис. 12.16, кривые M_s), что

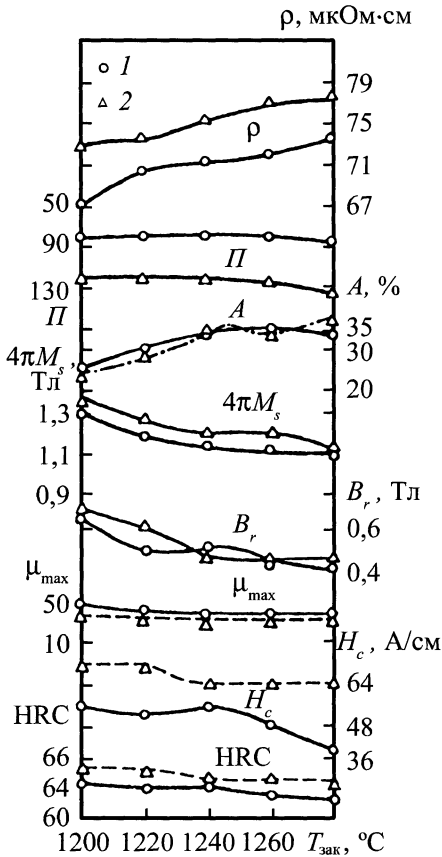


Рис. 12.17. Зависимости физико-механических характеристик сталей P9 (1) и P9K5 (2) от температуры закалки (закалочная среда – масло при $t = 20^\circ\text{C}$)

оказывает существенное влияние на физико-механические свойства. С повышением температуры закалки при небольших еще количествах остаточного аустенита твердость продолжает возрастать и при температурах $1000 \dots 1040^\circ\text{C}$ достигает максимального значения: HRC 56 ... 57 для стали X12Ф1 и HRC 63 ... 64 для стали X12M, а затем снижается. При этих температурах закалки в стали X12M сохраняется мелкое зерно, в мартенсите содержится 0,40 ... 0,45 % С, а в структуре стали – до 20 % остаточного аустенита.

При дальнейшем увеличении температуры закалки, а следовательно, количества остаточного аустенита твердость стали и максимальная магнитная проницаемость снижаются. Разупрочнению стали способствует рост зерна. Коэрцитивная сила после некоторого спада при $T_{zak} = 1050 \dots 1100^\circ\text{C}$, соответствующего содержанию 60 % остаточного аустенита, начинает резко увеличиваться. Для этого интервала температур закалки наблюдается небольшое увеличение удельного электрического сопротивления. По-видимому, такое поведение H_c и ρ вызвано изменением соотношений объемов карбидной фазы и остаточного аустенита в стали, когда уменьшение объема одной фазы и увеличение другой сопровождаются изменением содержания легирующих элементов в твердом растворе, общего объема включений и степени их дисперсности.

На рис. 12.16 приведены закономерности изменения физико-механических характеристик стали X12Ф1 от температуры закалки для двух случаев: закалка на воздухе и закалка в масле. Сравнение соответствующих кривых свидетельствует об их незначительном расхождении.

Высокотемпературный отпуск при 520°C приводит к уменьшению количества остаточного аустенита в образцах, закаленных в интервале $850 \dots 1150^\circ\text{C}$, что сопровождается изменением всех рассматриваемых характеристик. При $T_{zak} > 1150^\circ\text{C}$ легированный аустенит становится настолько устойчивым к распаду, что даже после двукратного отпуска при 520°C его количество по сравнению с закаленным состоянием уменьшается незначительно.

Стали, легированные вольфрамом. После закалки быстрорежущих сталей основной структурной составляющей является высоколегированный мартенсит, обладающий высокой твердостью при концентрации в нем 0,3 ... 0,5 % С. Результаты исследований магнитных, электрических свойств и твердости быстроре-

жущих сталей P9, P9K5, P9Ф5, P10K5Ф5 в зависимости от температуры закалки (рис. 12.17) показывают, что наибольшие изменения претерпевают коэрцитивная сила, остаточная индукция, намагниченность насыщения и удельное электрическое сопротивление. Основной причиной, приводящей к изменению этих параметров, является рост количества остаточного аустенита в стали вследствие повышения легированности твердого раствора.

При изменении физико-механических свойств сталей P6M3, P6M5 и P18 в зависимости от температуры закалки после одно-, двух- и трехкратного отпуска можно отметить, что значения HRC, H_c и ρ для этих сталей с повышением температуры аустенизации растут. Коэрцитивная сила претерпевает наибольшие изменения при $T_{\text{зак}} > 1200$ °С. Физические свойства сталей будут определяться в основном изменением степени легирования твердого раствора, поскольку после отпуска стали, закаленной от более высоких температур и имеющей более легированный твердый раствор, образуется большее число специальных дисперсных карбидов. Увеличение их количества вызывает дисперсионное твердение, при этом твердость, коэрцитивная сила, потери энергии на перемагничивание и удельное электрическое сопротивление увеличиваются, а максимальная магнитная проницаемость уменьшается. Увеличение числа отпусков для быстрорежущей стали сопровождается уменьшением количества остаточного аустенита и снятием внутренних напряжений, при этом H_c и ρ уменьшаются, а μ_{max} увеличивается.

Высокая твердость стали XB5 обусловлена присутствием большого количества дисперсных карбидов вольфрама при сохранении высокой концентрации углерода в мартенсите, поскольку в карбидах типа Me_6C связано относительно небольшое количество углерода (до 0,1 % С на 1 % W). Сталь XB5 обладает небольшой прокаливаемостью и используется в ос-

новном для изготовления режущего и граверного инструмента, предназначенного для чистовой обработки металла повышенной твердости. Эта сталь имеет более высокую температуру закалки по сравнению с углеродистыми сталями вследствие легирования ее хромом, вольфрамом, кремнием и более медленного растворения карбидов. При перегреве стали (закалка от 850 ... 1000 °С) изменение физико-механических свойств (снижение HRC и H_c , повышение ρ) в основном вызвано увеличением количества остаточного аустенита. Для снижения количества остаточного аустенита в стали очень часто после закалки применяют обработку холодом. При этом твердость возрастает, а удельное электрическое сопротивление уменьшается. Коэрцитивная сила стали XB5 при обработке холодом повышается вследствие образования дополнительного количества мартенсита, а также, по-видимому, из-за сокращения числа центров зародышей перемагничивания, роль которых играли крупные включения остаточного аустенита.

12.3.7. Мартенситно-стареющие и аустенитно-мартенситные стали специального назначения

В отдельных отраслях машиностроения растет удельный объем использования сталей специального назначения, которые, как правило, являются сложнoleгированными и могут принадлежать к мартенситно-ферритному, аустенитно-мартенситному и аустенитно-ферритному классам. Широкое распространение также получили мартенситно-стареющие стали. Обширная номенклатура сталей специального назначения предполагает и большое различие их физических свойств, поэтому установить какие-либо общие закономерности изменения магнитных свойств для этих сталей затруднительно.

Современному машиностроению необходимы материалы, обладающие высокой конструктивной прочностью и доста-

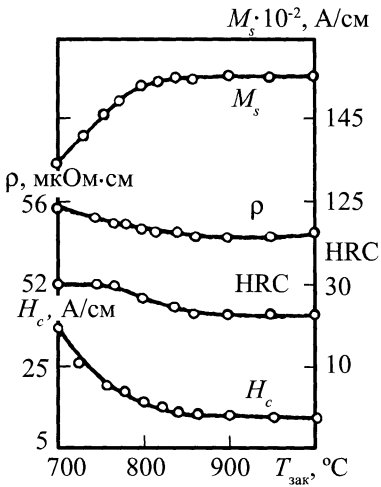


Рис. 12.18. Зависимости физико-механических характеристик стали 4С5ВИ от температуры закалки (закалочная среда – воздух; состав стали: 0,01 % С, 18,3 % Ni, 0,78 % Ti, 3,33 % Mo)

точно высоким сопротивлением развитию трещины. Этим требованиям удовлетворяют мартенситно-стареющие стали, которые упрочняются в два этапа: за счет получения мартенситной структуры в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и последующего старения. Мартенситно-стареющие стали являются безуглеродистыми (содержание С не превышает 0,03 %), поэтому мартенсит этих сталей отличается от мартенсита углеродистых сталей. В результате закалки мартенсит стареющих сталей остается мягким, а его упрочнение происходит в процессе старения. В отличие от углеродистых сталей скорость охлаждения не оказывает влияния на превращение аустенит–мартенсит. Даже при скоростях охлаждения $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ температура превращения в мартенситно-стареющих сталях была настолько низкой, что можно говорить о чисто мартенситном превращении. Чтобы мартенсит сплава Fe–Ni приобрел способность упрочняться, в двойную систему необходима добавка ряда элементов (Mo, Ti, Al и др.), которые в процессе старения способствуют образованию интерметаллидных упрочняющих фаз.

Результаты исследования по влиянию температуры аустенизации на физические свойства стали 4С5ВИ представлены на рис. 12.18. При низких температурах аустенизации в промежуточной двухфазной области в стали происходит перераспределение легирующих элементов, что приводит к обогащению аустенита этими элементами, в основном никелем. Обогащенный аустенит остается стабильным при охлаждении сплава до комнатной температуры. Количество остаточного аустенита будет тем меньше, чем выше скорость и температура нагрева, поскольку уменьшается время пребывания сплава в двухфазной ($\alpha + \gamma$) области и повышается степень гомогенизации аустенита. Уменьшение количества остаточного аустенита в сплавах при повышении температуры закалки приводит к росту намагниченности насыщения в интервале $T_{\text{zak}} = 700 \dots 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ (см. рис. 12.18, кривая M_s). При нагреве выше $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ в течение 1 ч происходит гомогенизация аустенита, т.е. состав γ -фазы соответствует среднему составу сплава, и при охлаждении практически весь аустенит превращается в мартенсит (для 4С5ВИ $M_k = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$, для 4С25ВИ $M_k = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$). Образцы, закаленные от температур $820 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$, имеют практически одинаковую структуру и, как следствие этого, исследуемые свойства тоже не изменяются (см. рис. 12.18).

Снижение коэрцитивной силы и удельного электрического сопротивления в основном связано с уменьшением количества остаточного аустенита в структуре закаленной стали. Растворение интерметаллидов, возрастающее с повышением температуры закалки, должно повышать удельное электрическое сопротивление. Однако влияние данного фактора сводится лишь к замедлению спада ρ . Например, в стали 4С5ВИ увеличение намагниченности насыщения в интервале $700 \dots 820 \text{ } ^\circ\text{C}$, обусловленное только изменением количества остаточного аустенита, составляет 16 %, а удельное электрическое сопротив-

ление уменьшается на 4 % (см. рис. 12.18, кривые M_s и ρ). Закаленный, или "мягкий", мартенсит, полученный в результате охлаждения из γ -области, характеризуется невысокой твердостью. Растворение интерметаллидов при высоких температурах аустенизации вызывает снижение твердости.

Хорошим сочетанием высокой прочности и ударной вязкости обладают стали аустенитно-мартенситного класса. Прочностные свойства во многом зависят от структуры стали, формирующейся в результате сложной термической обработки, которая включает закалку на аустенит, обработку холодом и отпуск. На примере стали 13X15H4AM3-Ш рассмотрим изменение физических свойств стали при закалке от различных температур и обработке холодом при температуре $-72 \dots -65 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 ч (рис. 12.19). Исходное состояние перед закалкой получали путем трехступенчатого отжига: 1) нагрев до $780 \text{ }^\circ\text{C}$ – 3 ч; охлаждение на воздухе; 2) отжиг при $520 \text{ }^\circ\text{C}$ – 40 ч; 3) отжиг при $600 \text{ }^\circ\text{C}$ – 3 ч. Оптимальные механические свойства сталь приобретает при закалке от $1070 \text{ }^\circ\text{C}$, когда происходит полное растворение карбидов. После обработки холодом в структуре стали содержится 80 ... 85 % мартенсита и остаточный аустенит. Большое количество мартенсита в стали придает ей повышенную прочность, но при этом несколько уменьшается пластичность.

Магнитные и механические свойства во многом зависят от соотношения содержащихся в структуре стали остаточного аустенита и мартенсита. При повышении температуры нагрева под закалку от 700 до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ количество остаточного аустенита уменьшается (см. рис. 12.19, кривая M_s), что связано с дополнительным выделением карбидов и обеднением твердого раствора углеродом и легирующими элементами. Образующийся при $850 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ мартенсит содержит меньше углерода, но

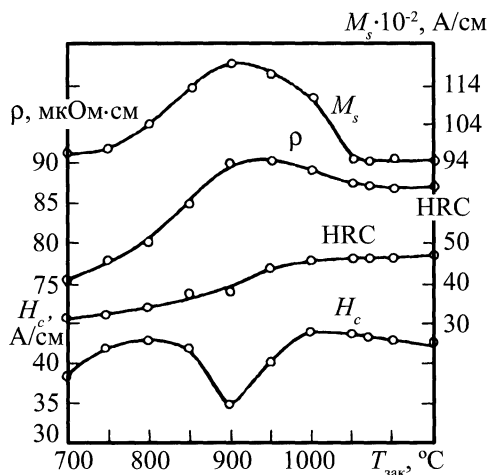


Рис. 12.19. Зависимости физико-механических характеристик стали 13X15H4AM3-Ш от температуры закалки и последующей обработки (закалочная среда – вода при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

при этом твердость практически не изменяется. Минимальному содержанию остаточного аустенита в интервале $T_{\text{зак}} = 850 \dots 950 \text{ }^\circ\text{C}$ соответствует минимум H_c , появляющийся вследствие уменьшения магнитных полей рассеяния на включениях, роль которых выполняет остаточный аустенит. При закалке стали от температур выше $900 \text{ }^\circ\text{C}$ из-за интенсивного растворения карбидов образуется более легированный твердый γ -раствор, который устойчив к распаду даже после обработки холодом, что повышает количество остаточного аустенита в структуре закаленной стали и соответственно значение H_c . Незначительное снижение H_c в интервале температур $1000 \dots 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, возможно, вызвано появлением δ -феррита.

Закономерности изменения удельного электрического сопротивления, по-видимому, определяются количеством и степенью дисперсности карбидных включений в стали. Выделение карбидной фазы сопровождается ростом значения ρ , несмотря на снижение количества остаточного аустенита в стали. В свою очередь, растворение карбидов вызывает некоторое снижение ρ .

При $T_{\text{зак}} = 1050$ °С карбидная фаза растворяется полностью, в результате чего количество остаточного аустенита в стали становится постоянным и все изученные физические свойства при этих температурах практически не изменяются.

12.3.8. Особенности изменения намагниченности насыщения при закалке сталей в интервале температур $A_{c1}-A_{c3}$

При изучении физических свойств доэвтектоидных сталей отмечено, что для ряда конструкционных легированных сталей, закаленных из межкритического интервала температур $A_{c1}-A_{c3}$, наблюдается существование минимума намагниченности насыщения. Появление минимума M_s вызвано образованием легированного аустенита, который весьма устойчив при мартенситном превращении.

При закалке из межкритического интервала температур количество образовавшегося остаточного аустенита сильно зависит от температуры нагрева. Значение максимума остаточного аустенита (минимума M_s) и его местоположение зависят от химического состава стали. Кроме того, значение этого максимума определяется исходной структурой стали и скоростью охлаждения при закалке. Из анализа изменения намагниченности насыщения следует, что количество образовавшегося остаточного аустенита в интервале температур закалки $A_{c1}-A_{c3}$ превышает величину, соответствующую закалке от более высоких температур. Увеличение степени легирования стали никелем и марганцем приводит к снижению температуры начала образования остаточного аустенита, а также к смещению максимального содержания аустенита в область низких температур закалки, что связано с понижением под влиянием этих легирующих элементов нижней границы критического интервала.

Появление минимума намагниченности насыщения обусловлено образованием легированного аустенита, очень устойчи-

вого к полному или частичному переохладению до комнатной температуры. В этой связи рекомендуется для точного определения нижней границы критического интервала конструкционных легированных сталей использовать магнитные методы.

12.3.9. Магнитный структурный анализ закаленных изделий

Анализ закономерностей изменения магнитных свойств в зависимости от температуры закалки указывает на возможность использования большинства из них только для выявления структур недогрева при закалке доэвтектоидных углеродистых и низколегированных конструкционных сталей. При переходе от структур недогрева к мартенситным структурам магнитная проницаемость, магнитострикция, коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, поле максимальной магнитной проницаемости, потери энергии на перемагничивание, измеренные в средних магнитных полях, изменяются более чем в 2 раза. Меньшие изменения имеет намагниченность насыщения, поведение которой определяется изменениями в фазовом составе стали.

Начиная с некоторой температуры нагрева под закалку дальнейшее ее увеличение не приводит к существенному изменению магнитных свойств большинства сталей. Однако для ряда сталей (см. рис. 12.5–12.10) при перегреве наблюдаются небольшие изменения коэрцитивной силы, твердости и удельного электрического сопротивления, по которым судить о перегреве сталей не представляется возможным. Поскольку физико-механические свойства закаленной стали при перегреве практически не изменяются, то можно предположить, что перегрев доэвтектоидных сталей в каких-то пределах допустим.

Небольшие изменения состава стали по углероду и легирующим элементам в пределах марки оказывают в равной мере влияние на магнитные и прочностные

свойства стали. Поэтому магнитные методы можно успешно использовать для определения прочностных характеристик изделий при колебаниях химического состава в пределах марки. В большей степени колебания химического состава в пределах марки оказывают влияние на электрические и соответственно на электромагнитные свойства сталей.

В отличие от доэвтектоидных, заэвтектоидные стали оказываются чувствительными к перегреву при закалке, поэтому могут быть случаи появления брака вследствие как недогрева, так и перегрева. Значительный недогрев при закалке изделий из заэвтектоидных сталей можно выявить по величине коэрцитивной силы или других магнитных характеристик. Незначительный перегрев или недогрев изделий магнитными или электромагнитными методами определить невозможно, поскольку те и другие изделия могут иметь близкие значения магнитных и электромагнитных характеристик. Невозможно это сделать и по значению твердости изделий.

Закономерности изменения магнитных свойств и твердости заэвтектоидных сталей при вариации температуры закалки схематически иллюстрирует рис. 12.20, из которого следует, что выявление недогрева и перегрева возможно лишь при использовании двух магнитных параметров контроля: коэрцитивной силы и намагниченности насыщения (заштрихованная зона соответствует оптимальной температуре закалки). Высокие значения намагниченности насыщения и низкие коэрцитивной силы свидетельствуют о недогреве, пониженные значения коэрцитивной силы и низкие намагниченности насыщения – о перегреве. Данная методика неразрушающего контроля качества закалки изделий из заэвтектоидных сталей широко используется на многих подшипниковых заводах страны. Одновременно с качеством закалки она позволяет определить количество остаточного аустенита в стали после закалки.

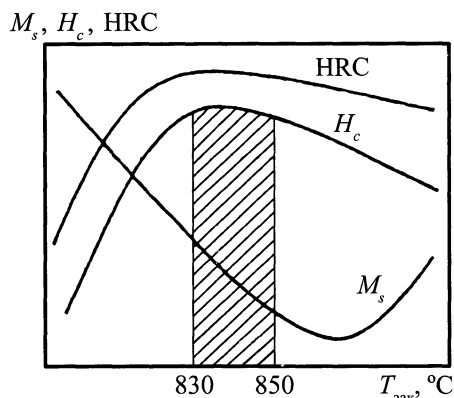


Рис. 12.20. Схематическое изображение зависимостей коэрцитивной силы, намагниченности насыщения и твердости подшипниковых сталей от температуры закалки

Введение в сталь легирующих элементов приводит к некоторому видоизменению характера зависимости магнитных свойств от температуры закалки, что, естественно, влияет на выбор параметров неразрушающего контроля. При небольших количествах легирующих элементов для сталей сохраняются те же закономерности изменения физических свойств, что и для углеродистых доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей. Так, для магнитных свойств стали 50XBC (см. рис. 12.6, в) характерна та же зависимость, что и для доэвтектоидных сталей. Поэтому недогрев в этой стали может быть выявлен по любой из исследуемых характеристик. Однако для этой стали, в отличие от углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, с повышением температуры закалки наблюдается увеличение удельного электрического сопротивления, что предполагает возможным использовать ρ для определения перегрева изделий при закалке.

Закономерности изменения характеристик M_s и ρ стали 20X13 (см. рис. 12.15) близки к закономерностям, наблюдаемым для заэвтектоидных углеродистых сталей, поэтому для контроля качества закалки изделий из указанной стали можно реко-

мендовать те же магнитные параметры контроля. Наиболее сильно к колебаниям химического состава чувствительны характеристики M_s и ρ , в меньшей степени – коэрцитивная сила и твердость.

Для сталей X12M и X12Ф1 (см. рис. 12.16) характерно несколько отличное по сравнению с углеродистыми заэвтектоидными сталями поведение магнитных свойств при вариации температуры закалки. Анализ закономерностей изменения магнитных свойств указывает на возможность контроля качества закалки изделий из этих сталей. По значениям намагниченности насыщения и коэрцитивной силы можно судить как о недогреве, так и о перегреве сталей при закалке.

Для контроля качества изделий из сталей P9, P9K5, P9Ф5 и P10K5Ф5 можно использовать намагниченность насыщения (см. рис. 12.17), поскольку основные изменения, происходящие в сталях при вариации температуры закалки, связаны с изменением количества остаточного аустенита.

Прочностные свойства мартенситно-старееющих сталей определяются температурой нагрева и временем выдержки при аустенизации. Достижение гомогенности твердого γ -раствора приводит к тому, что при охлаждении образуется чисто мартенситная структура. Присутствие в стали ЧС5ВИ определенного количества остаточного аустенита, свидетельствующего о недостаточной гомогенизации γ -фазы, можно установить как по намагниченности насыщения, так и по значению коэрцитивной силы (см. рис. 12.18).

В высокопрочной коррозионно-стойкой стали 13X15N4AM3-Ш переходного аустенитно-мартенситного класса для получения высоких значений ударной вязкости применяют нагрев под закалку от 1050 ... 1070 °С, поскольку именно при этих температурах отмечается наиболее полное растворение карбидов. Измерив два параметра – намагниченность насыщения и удельное электрическое сопро-

тивление (см. рис. 12.19), можно качественно установить, произошло ли растворение карбидов. Когда значение M_s минимально, а ρ относительно велико, можно считать, что сталь была нагрета при закалке до температур 1050 ... 1150 °С.

Определенное воздействие на уровень физических свойств стали после закалки оказывает исходная структура. Наглядно это можно проследить на примере сталей 18X2H4BA (см. рис. 12.8) и ШХ15, ШХ15СГ (см. рис. 12.14), для которых различие в исходной структуре до закалки сопровождается различием магнитных и электрических свойств сталей после закалки.

Изменение скорости охлаждения при закалке (вследствие использования разных закалочных сред) влияет как на механические, так и на магнитные свойства стали (см. рис. 12.16). Поэтому выбранные методики неразрушающего контроля качества закаленных изделий, как правило, должны применяться только для закалочных сред, которые обеспечивают примерно одинаковую скорость охлаждения.

Таким образом, магнитные и электрические характеристики сталей могут широко применяться при разработке методов неразрушающего контроля структурно-фазового состояния и прочностных свойств закаленных сталей различных классов.

12.4. ОТПУСК СТАЛЕЙ

12.4.1. Структурно-фазовые изменения при отпуске закаленных сталей

Отпуск – процесс термической обработки, вызывающий превращение неравновесных структур закаленного состояния в более устойчивые. Отпуск осуществляется путем нагрева изделий до температур ниже интервала фазовых превращений, выдержки при этих температурах и последующего охлаждения. В результате отпуска получают более устойчивые структуры по схеме мартенсит–троостит, сорбит

и, как следствие этого, возникает требуемое сочетание механических свойств с одновременной релаксацией внутренних напряжений. В зависимости от температуры нагрева различают *низкий* (130 ... 250 °С), *средний* (250 ... 500 °С) и *высокий* (500 ... 700 °С) отпуск.

Для процессов, происходящих при нагреве в закаленных углеродистых и низкоуглеродистых сталях, можно выделить четыре характерные области превращений при отпуске.

Первое превращение при отпуске, наблюдающееся при температурах до 150 °С, связано с частичным выделением углерода из твердого α -раствора (первая стадия распада мартенсита). Выделяющийся из твердого раствора углерод снижает степень тетрагональности решетки мартенсита, и при этом в кристаллах мартенсита могут образоваться дисперсные карбидные частицы, равномерно распределенные по их объему. Экспериментальные данные указывают на то, что в высокоуглеродистых сталях, отпущенных при 100 °С, присутствуют два типа твердых растворов с разной концентрацией углерода: I – твердый раствор с исходной концентрацией углерода (мартенсит закалки); II – твердый раствор с 0,20 ... 0,25 % С, имеющий меньшую степень тетрагональности решетки с отношением $c/a \approx 1,01$ (мартенсит отпуска).

Увеличение времени выдержки сопровождается повышением количества твердого раствора типа II за счет уменьшения исходного. Таким образом, первое превращение при отпуске имеет так называемый двухфазный характер. Наряду с двухфазным распадом может наблюдаться однофазный распад, для которого характерно постепенное уменьшение степени тетрагональности исходного твердого раствора.

Выделение углерода из пересыщенного твердого раствора приводит к тому, что внутри кристаллов мартенсита происходит перераспределение углерода, обра-

зуются его скопления, а затем появляются зародыши карбидной фазы. Зародыши растут и достигают определенного размера, при котором их рост прекращается вследствие малой скорости диффузии углерода при этих температурах отпуска.

Возможными местами возникновения зародышей карбидной фазы при низких температурах отпуска являются границы реечного мартенсита, а при высоких – границы зерен феррита. Образовавшиеся дисперсные карбидные частички находятся в "коллоидном равновесии" с обедненным твердым раствором, т.е. концентрация углерода в твердом растворе зависит от размеров частиц карбидной фазы. При достижении коллоидного равновесия выделение углерода из пересыщенного твердого α -раствора прекращается.

Стадия распада мартенсита приходится на область температур 150 ... 300 °С и сопровождается медленным понижением концентрации углерода в твердом растворе вследствие коагуляции карбидных частиц и смещения коллоидного равновесия. Скорость распада мартенсита определяется скоростями диффузии углерода в стали и роста кристаллов карбидной фазы. Понижение концентрации углерода в твердом растворе сопровождается снижением тетрагональности решетки. Так, при температуре отпуска 300 °С и выдержке в течение 1 ч в твердом растворе содержится менее 0,1 % С, а значения постоянных c и a решетки твердого раствора с точностью до погрешности измерения соответствуют постоянным решетки α -железа. Легирование стали существенно изменяет температурную область протекания второй стадии распада мартенсита. Таким образом, при распаде мартенсита уменьшается степень тетрагональности решетки и снижаются внутренние напряжения, что, в свою очередь, должно сопровождаться уменьшением удельного электрического сопротивления и снижением магнитной жесткости стали.

Преобразование при температурах 180 ... 260 °С сопровождается увеличением объема стали и связано с переходом остаточного аустенита в гетерогенную смесь со структурой, напоминающей структуру бейнита, состоящего из пересыщенного твердого раствора и карбидной фазы. Остаточный аустенит расположен в виде тонких прослоек толщиной в несколько сотен ангстрем между слоями в мартенситных пакетах.

Преобразование при отпуске (300 ... 400 °С) заключается в превращении ϵ -карбида в цементит. В низкоуглеродистых сталях (< 0,4 % С) осуществляется переход ϵ -карбида непосредственно в цементит. По мнению многих исследователей, верхняя температурная граница существования ϵ -карбида находится в пределах 250 ... 300 °С. В средне- и высокоуглеродистых сталях образование цементита идет путем постепенного перехода ϵ -карбида в промежуточный χ -карбид, который в интервале температур отпуска 300 ... 550 °С превращается в цементит. Возможны также более сложные схемы перехода χ -карбида в цементит.

В легированных сталях в начальный период отпуска образуется цементит, состав которого не отличается от среднего состава стали по легирующим элементам. Марганец, хром, вольфрам и молибден присутствуют в цементите, замещая атомы железа. Марганец замещает железо неограниченно – от $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ до Mn_3C ; хром – до 18 %, молибден – до 1 % и вольфрам – до 0,6 %. Более сильные карбидообразующие элементы (V, Ti, Zr, Nb) практически не присутствуют в цементите. Образование специальных карбидов обычно связано с измельчением карбидной фазы, что вместе с задержкой разупрочнения матрицы вызывает вторичное твердение.

Четвертое превращение (400 ... 700 °С) сопровождается интенсивным развитием процессов коагуляции и рекристаллиза-

ции. При коагуляции карбидов тонкая ферритно-цементитная смесь (троостит отпуска) превращается в более грубую – сорбит отпуска. Сорбит с повышением температуры отпуска превращается в перлит отпуска (зернистый перлит), при этом геометрические размеры карбидных частиц увеличиваются в десятки раз. По мере увеличения карбидных частиц и уменьшения содержания углерода в стали общая скорость процесса коагуляции понижается. Хром, молибден, ванадий, вольфрам замедляют процесс коагуляции, который начинает интенсивно развиваться при температурах выше 450 °С. Никель ускоряет коагуляцию. Одновременно с процессом коагуляции происходит рост зерен феррита, а также уменьшение уровня микронапряжений. Карбидообразующие элементы (Cr, W, Mo) затрудняют процессы рекристаллизации феррита.

Таким образом, при отпуске закаленной стали могут происходить следующие процессы:

- 1) перераспределение атомов углерода в твердом растворе (мартенсите) – перемещение атомов углерода к дислокациям, перераспределение их по междуузлиям кристаллической решетки;

- 2) распад мартенсита с образованием областей, обогащенных углеродом, а затем карбидных выделений; изменение структуры и состава карбидов, их взаимосвязи с матрицей;

- 3) превращение остаточного аустенита в зависимости от легирования и температурного интервала – промежуточное (бейнитное) и перлитное; превращение остаточного аустенита при охлаждении после высокого отпуска (вторичная закалка);

- 4) выделение дисперсных частиц специальных карбидов из твердого раствора (вторичное твердение); изменение состава и структуры карбидов в легированных сталях по мере повышения температуры отпуска;

5) релаксация напряжений, изменение тонкой структуры мартенсита, рекристаллизация α -фазы;

6) коагуляция карбидов;

7) перераспределение легирующих элементов и примесей.

Наглядное представление об основных процессах, протекающих при отпуске углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, дает рис. 12.21.

Кривая 1 рис. 12.21 отражает процесс выделения углерода из пересыщенного твердого раствора. Температура, при которой начинается выделение углерода из мартенсита, определяется содержанием углерода в стали, причем температура начала выделения тем выше, чем меньше концентрация углерода. В высокоуглеродистой стали распад мартенсита начинается при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, в среднеуглеродистой ($0,5\text{ \% C}$) – выше $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в малоуглеродистой стали ($< 0,2\text{ \% C}$) – выше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно, менее пересыщенный твердый раствор более устойчив.

Очень тесно с процессом выделения углерода из мартенсита связан процесс изменения суммарных микронапряжений, который находится в сильной зависимости от количества углерода и степени легирования стали. Суммарные микронапряжения можно разделить на три типа: закалочные напряжения (кривая 2 на рис. 12.21), возникающие при фазовых превращениях из-за различия решеток аустенита и мартенсита; когерентные (кривая 3), происхождение которых обусловлено различием когерентно сопряженных решеток мартенсита и образующихся карбидов, а величина определяется числом и объемом зародышей карбидной фазы в стали; дисперсионные (кривая 4), образующиеся при обособлении кристаллов карбидов от твердого раствора.

С увеличением температуры примерно до $300 \dots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ растет объем выделяющейся карбидной фазы, в то время как размеры карбидных частиц меняются незначительно (кривая б). Карбидные части-

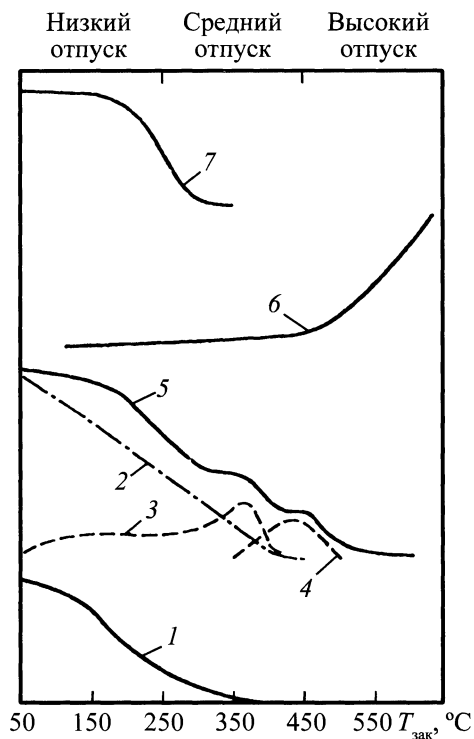


Рис. 12.21. Схематическое отображение процессов, протекающих при отпуске углеродистых и низколегированных конструкционных сталей

цы при низкотемпературном отпуске имеют форму, близкую к пластинам или стержням, причем длина их может достигать 400 нм , а толщина – $25 \dots 40\text{ нм}$. Повышение температуры или увеличение продолжительности отпуска приводит к коагуляции и сфероидизации карбидных частиц. Наиболее интенсивно частицы начинают коагулировать при температуре отпуска выше $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $500 \dots 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ большинство частиц приобретают сферическую форму.

Распад остаточного аустенита (кривая 7) протекает в интервале температур $200 \dots 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продуктами распада являются отпущенный мартенсит и дисперсные карбиды.

Рассмотренные выше процессы определяют характер изменения магнитных, электрических свойств и твердости при

отпуске закаленной стали, которые, в свою очередь, зависят от содержания углерода и легирующих элементов в стали. По типу зависимости магнитных свойств от температуры отпуска сталей разных классов можно выделить *пять групп*, в пределах которых магнитные свойства имеют близкие тенденции изменения при отпуске:

- 1) низкоуглеродистые и легированные конструкционные стали с содержанием углерода до 0,3 %;
- 2) среднеуглеродистые и легированные конструкционные стали с содержанием углерода 0,3 ... 0,4 %;
- 3) средне-, высокоуглеродистые и легированные конструкционные стали с содержанием углерода более 0,4 %;
- 4) высоколегированные стали;
- 5) мартенситно-стареющие, аустенитно-мартенситные и ферритно-аустенитные стали специального назначения.

Следует отметить, что приведенное деление сталей на группы условно, но так как оно основано на общности закономерностей изменения магнитных свойств сталей при отпуске, то позволяет дать рекомендации по использованию магнитных характеристик для контроля изделий из этих групп сталей.

12.4.2. Низкоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода до 0,3 %

Отпуск закаленных сталей приводит к уменьшению степени магнитной жесткости. Кривые намагничивания (рис. 12.22) по мере увеличения температуры отпуска становятся более крутыми, т.е. эффективная константа магнитной анизотропии отпущенной стали уменьшается. Отпуск закаленной стали сопровождается увеличением магнитной проницаемости μ , а также изменением многих магнитных свойств сталей. Из сопоставления петель магнитного гистерезиса, измеренных для различно отпущенных образцов из стали 18ХНВА, следует, что коэрцитивная сила

и потери энергии на перемагничивание уменьшаются, а остаточная индукция B возрастает. Существенное изменение претерпевает и форма петли гистерезиса. Таким образом, из анализа кривых намагничивания и магнитной проницаемости, а также петель магнитного гистерезиса следует, что магнитные свойства чувствительны к превращениям, происходящим при отпуске стали, и поэтому могут быть использованы для неразрушающего контроля качества закалки и последующего отпуска.

Для большинства сталей (рис. 12.23) характерно монотонное изменение магнитных и прочностных характеристик в интервале температур отпуска от комнатных до 600 ... 650 °С.

Монотонное уменьшение коэрцитивной силы, потерь энергии на перемагничивание, поля максимальной магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и увеличение магнитной и максимальной проницаемостей (см. рис. 12.22, 12.23) связаны с процессами, происходящими при отпуске: уменьшением искаженности решетки α -фазы вследствие выделения углерода; снижением внутренних микронапряжений; распадом остаточного аустенита, количество которого в этих сталях невелико.

В сталях 1-й группы содержится небольшое количество углерода. Объем карбидной фазы, образующейся в процессе отпуска, также невелик, поэтому карбидные включения, которые играют роль препятствий для смещающихся доменных границ, не оказывают значительного влияния на процессы намагничивания и перемагничивания. Их действие сводится лишь к некоторому замедлению снижения магнитных характеристик, например коэрцитивной силы. Распад аустенита при отпуске приводит к уменьшению магнитных полей рассеяния, связанных с исчезновением неферромагнитных включений в ферромагнитной матрице, и, следовательно, облегчает процессы перемагничива-

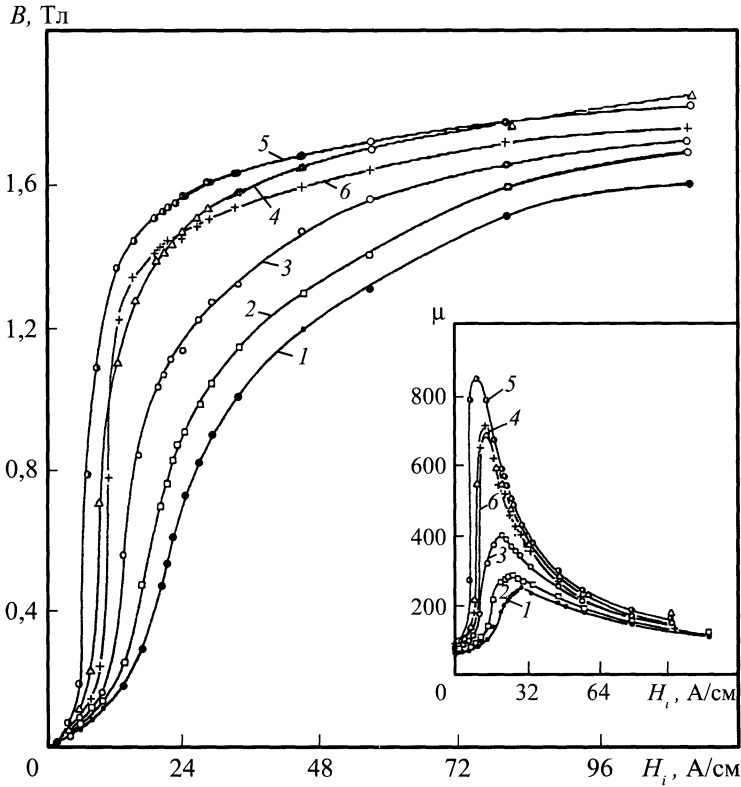


Рис. 12.22. Кривые намагничивания и проницаемости, полученные для тороидальных образцов из стали 18ХНВА при разных значениях $T_{отп}$, °С:
1 – 150; 2 – 250; 3 – 450; 4 – 560; 5 – 600; 6 – 650

ния. Относительно небольшое количество остаточного аустенита (см. рис. 12.23, кривые M_s) в этих сталях оказывает незначительное влияние на процессы намагничивания и перемагничивания.

Для сталей 10ГН, 18ХНВА, 20ХНФА и 20Х2Н4А при температурах отпуска выше 600 °С, а для стали 18ХНМА при температуре 575 °С и выше большинство физических характеристик, таких как коэрцитивная сила, потери энергии на перемагничивание, максимальная магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление, возрастают, а максимальная магнитная проницаемость и потери энергии на перемагничивание, измеренные в слабых магнитных полях, убывают вследствие частичной закалки сталей при этих температурах.

Для сталей 12ХН3А и 30ХН2МФА наблюдается резкое уменьшение намагниченности насыщения при высоких температурах отпуска (см. рис. 12.23, б, в), что связано с образованием легированного аустенита.

В сталях, легированных молибденом и ванадием, твердость при высоких температурах отпуска снижается незначительно, поскольку в этих условиях образуются специальные мелкодисперсные карбиды, которые вызывают вторичное твердение.

В сложнoleгированных сталях типа 12Х2НВФА, 28Х3СНМВФА-Ш (см. рис. 12.23, г) магнитные и электрические свойства изменяются монотонно с температурой отпуска. Изменение механических характеристик до $T_{отп} = 400$ °С незначительно по сравнению с магнитными ха-

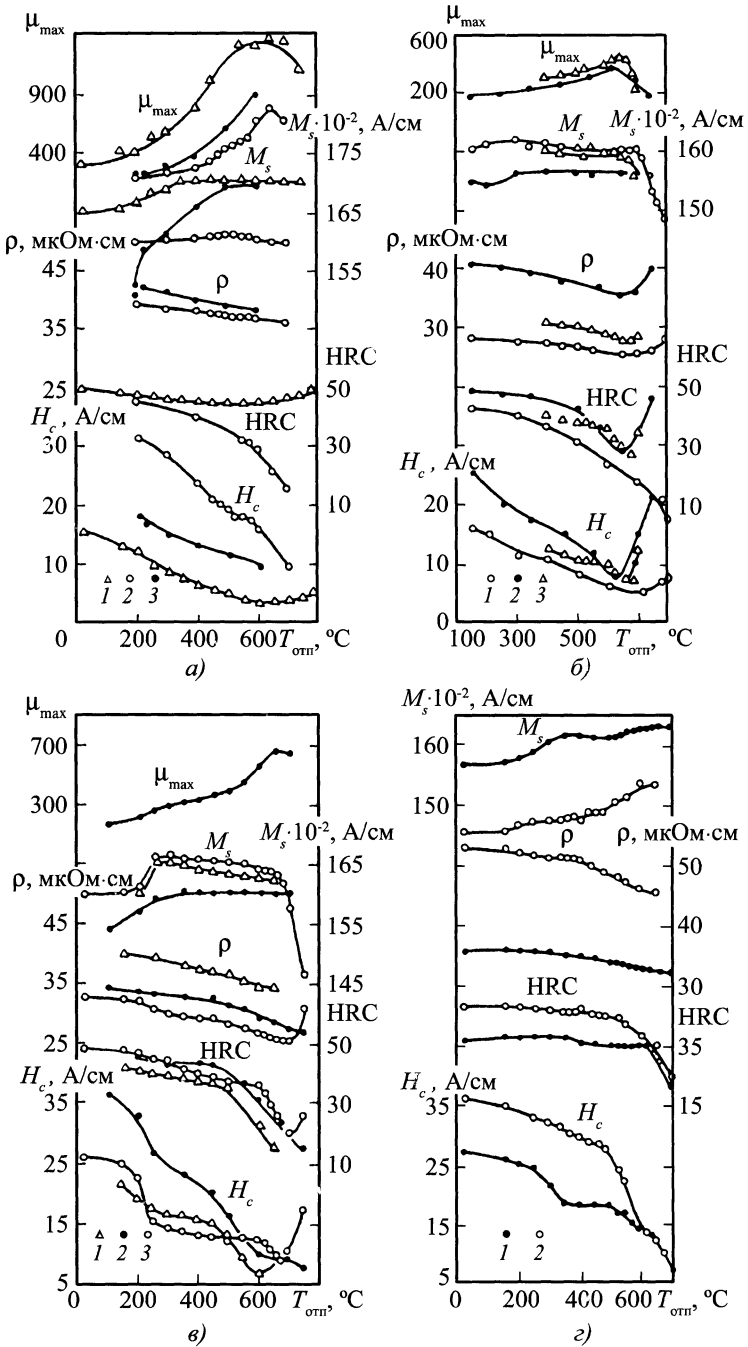


Рис. 12.23. Зависимости физико-механических характеристик сталей 1-й группы от температуры отпуска:

a – 10ГН (1), 18СГМ (2), 20ХГСНМ (3); *б* – 12ХН3А (1), 18ХНМА (2), 20ХНФА (3);
в – 18ХНВА (1), 30Х3МФ (2), 30ХН2МФА (3); *з* – 12Х2НВФА (1), 28Х3СНМВФА-Ш (2)

раактеристиками. В стали 28Х3СНМВФА-Ш твердость до этих же температур отпуска остается постоянной, а временное сопротивление уменьшается на 5 %. Изменение коэрцитивной силы и остаточной индукции тела при этом составляет 32 ... 29 % для стали 12Х2НВФА и 14 ... 12 % для стали 28Х3СНМВФА-Ш, что свидетельствует о большей чувствительности магнитных свойств к структурным изменениям по сравнению с механическими.

Изменение магнитных характеристик в стали 12Х2НВФА до 400 °С, по-видимому, вызвано распадом остаточного аустенита (см. рис. 12.23, з, кривая M_s). Кроме того, снижение H_c связано с выделением углерода из мартенсита и уменьшением внутренних напряжений. При температурах отпуска выше 350 °С в данной стали на продолжающийся процесс распада остаточного аустенита накладывается процесс распада мартенсита, который был задержан вследствие легирования стали хромом, кремнием и вольфрамом. Выделение мелкодисперсных карбидов с намагниченностью насыщения, меньшей намагниченности насыщения матрицы, сопровождается образованием в матрице дополнительных полей рассеяния и когерентных внутренних напряжений, которые затрудняют процессы перемагничивания и приводят к увеличению H_c . Действие двух противоположных факторов в интервале температур $T_{отп} = 350 \dots 500$ °С определяет поведение магнитных характеристик стали 12Х2НВФА.

В сталях типа 28Х3СНМВФА-Ш процесс распада остаточного аустенита и мартенсита смещен в область высоких температур отпуска по сравнению со сталью 12Х2НВФА, что вызвано более высоким легированием этих сталей кремнием, хромом и молибденом. Кремний значительно сильнее других элементов повышает устойчивость остаточного аустенита к распаду при отпуске и смещает интервал полного распада в область температур 500 ... 550 °С, поэтому для стали

28Х3СНМВФА-Ш распад остаточного аустенита протекает в интервале 500 ... 650 °С (см. рис. 12.23, з, кривая M_s). Процесс распада мартенсита и аустенита в этой стали при температурах отпуска выше 400 °С сопровождается значительным изменением магнитных, электрических и механических свойств. Распад остаточного аустенита при $T_{отп} = 500 \dots 650$ °С способствует уменьшению коэрцитивной силы вследствие исчезновения магнитных полей рассеяния. Легирование сталей сильными карбидообразующими элементами сопровождается процессами вторичного твердения, и твердость сохраняет свое значение до высоких температур отпуска. Процессы разупрочнения в стали 28Х3СНМВФА-Ш протекают в интервале $T_{отп} = 450 \dots 700$ °С, в стали 12Х2НВФА при 600 ... 700 °С.

12.4.3. Среднеуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,3 ... 0,4 %

Для сталей 2-й группы большинство физических характеристик претерпевает изменение в интервале температур отпуска от комнатной до 400 ... 450 °С, а при $T_{отп} = 450 \dots 650$ °С, в отличие от сталей 1-й группы, значительных изменений структурно-чувствительных магнитных характеристик не происходит.

При рассмотрении закономерностей изменений магнитных свойств сталей 2-й группы (рис. 12.24) можно отметить, что при температурах отпуска выше 400 °С, когда практически весь углерод выделился из решетки твердого α -раствора и находится в ферромагнитной матрице в связанном состоянии в виде карбидных включений (см. рис. 12.21), коэрцитивная сила, поле максимальной магнитной проницаемости и потери энергии на перемагничивание, измеренные в средних магнитных полях, практически не изменяются. Слабое изменение большинства магнитных свойств сталей этой группы при высокотемпературном отпуске вызва-

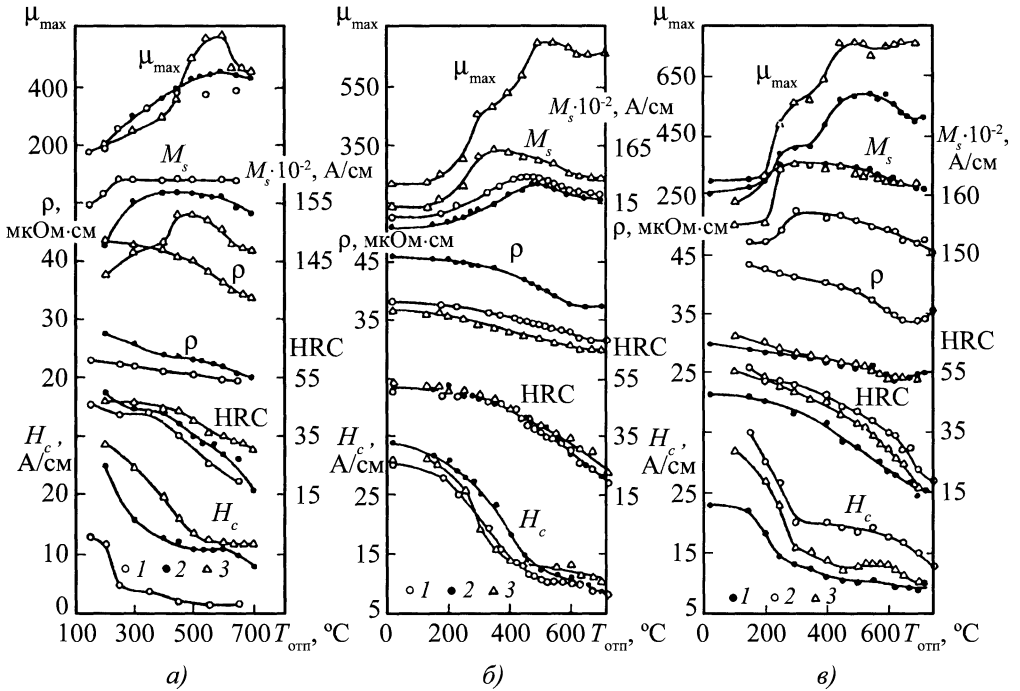


Рис. 12.24. Зависимости физико-механических характеристик сталей 2-й группы от температуры отпуска:
 а – 30 (1), 35ХМ (2), 40ХС (3); б – 30ХГСА (1) и 35ХГСА (2), 35СГМ (3);
 в – 32Х06 (1), 38ХМЮА (2), 38ХГНМ (3)

но уравнивающим влиянием структурных изменений, протекающих при этих температурах отпуска. С одной стороны, снижение внутренних напряжений (см. рис. 12.21, кривые 2–4) должно сопровождаться уменьшением коэрцитивной силы, с другой стороны – увеличение объема и размеров карбидных частиц – ростом H_c .

Увеличение содержания углерода в сталях 2-й группы по сравнению со сталями 1-й группы приводит к повышению количества остаточного аустенита, который распадается до 250 °C в углеродистых сталях, например в стали 30 (см. рис. 12.24, а), а в сталях, легированных кремнием, хромом и молибденом, – при более высоких температурах. Стали, легированные кремнием, имеют более высокие значения ρ и более низкие – M_s . Удельное электрическое сопротивление по мере

увеличения температуры отпуска монотонно убывает для всех сталей этой группы, но относительное изменение ρ с температурой отпуска невелико.

Прочностные свойства сталей 2-й группы при отпуске до 400 °C претерпевают меньшие изменения по сравнению с магнитными характеристиками. Интенсивное разупрочнение сталей, наблюдаемое при $T_{отп} > 400$ °C, связано с коагуляцией карбидной фазы и изменением дислокационной структуры. Коагуляция и сфероидизация карбидов осуществляются вследствие растворения мелкодисперсных частиц цементита. Как уже отмечалось, эти процессы происходят постепенно в широком интервале температур отпуска (400 ... 600 °C), что сопровождается снижением прочностных свойств и увеличением показателей пластичности.

12.4.4. Средне-, высокоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода более 0,4 %

К 3-й группе относится большое количество сталей различных классов, которые широко используются в современном машиностроении. Особенностью поведения структурно-чувствительных магнитных свойств сталей этой группы является то, что большинство из них в области средних и высоких температур отпуска изменяются неоднозначно (рис. 12.25–12.28).

Такое изменение магнитных свойств сталей этой группы существенно затрудняет проведение неразрушающего контроля качества закаленных и отпущенных изделий. Границы применимости тех или

иных магнитных параметров для неразрушающего контроля качества отпущенных изделий можно установить, исходя из исследований закономерностей изменения магнитных, электрических и механических свойств в зависимости от температуры и условий отпуска изделий.

Магнитострикция является структурно-чувствительной характеристикой, и с увеличением температуры отпуска ее значение для стали 34ХНЗМ растет (см. рис. 12.25). Для температур отпуска 500 ... 650 °С характерно совпадение кривых магнитострикции, т.е. магнитострикция высокоотпущенных образцов, измеренная при определенных значениях индукции (например, при $B = 1,4$ Тл), должна изменяться неоднозначно.

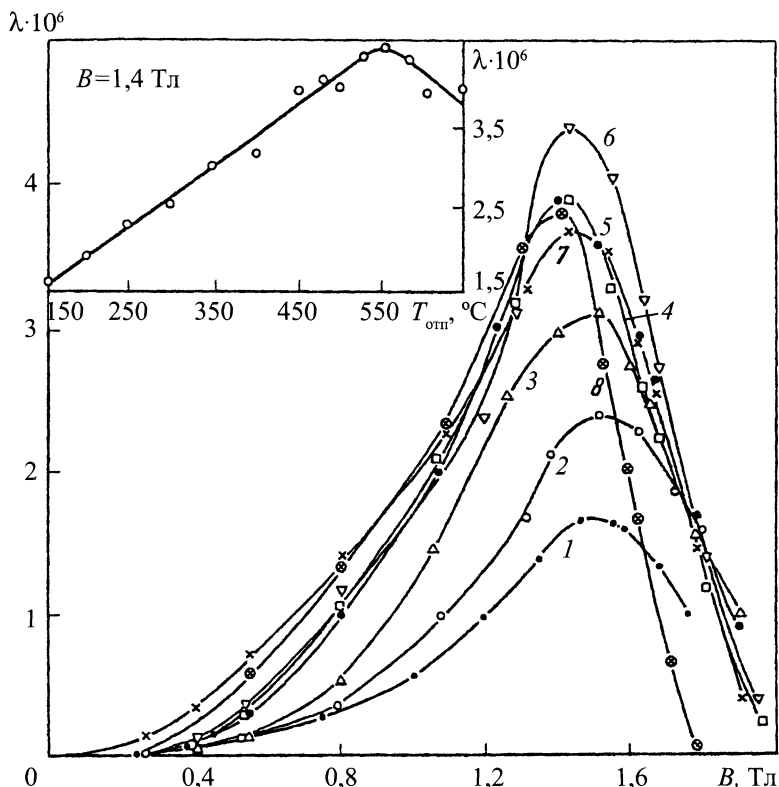


Рис. 12.25. Зависимости магнитострикции отпущенных образцов из стали 34ХНЗМ от индукции и магнитострикции, измеренной при $B = 1,4$ Тл, от температуры отпуска, °С: 1 – 150; 2 – 250; 3 – 400; 4 – 450; 5 – 500; 6 – 560; 7 – 600; 8 – 650

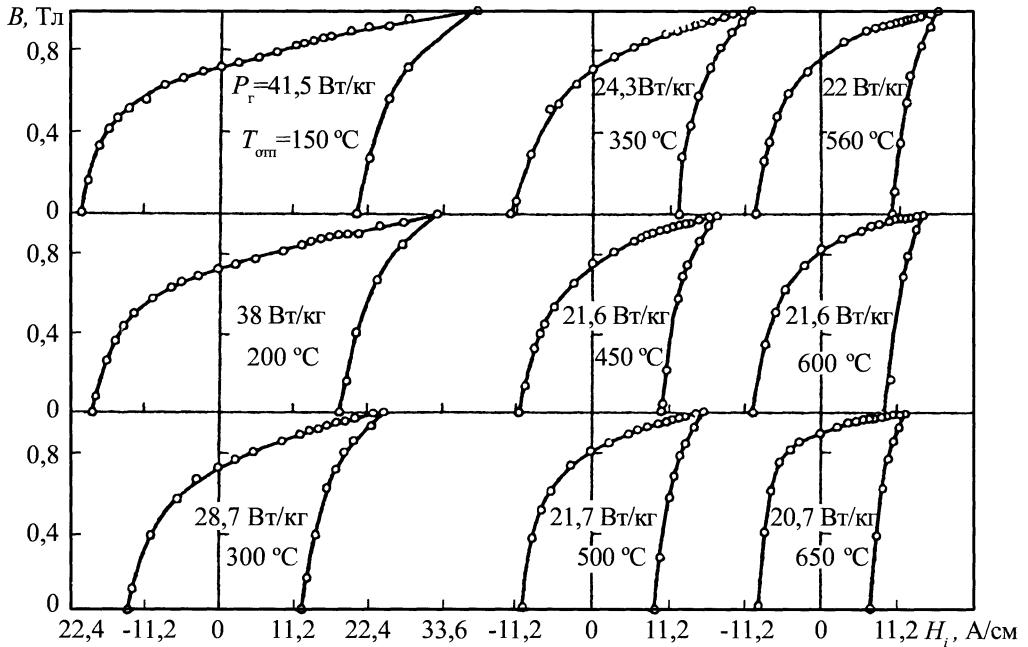


Рис. 12.26. Петли частного цикла магнитного гистерезиса ($B_{\max} = 1,0$ Тл) для тороидальных образцов из стали 34ХНЗМ с разной температурой отпуска

Изменение большинства магнитных параметров сталей при отпуске можно проследить на примере петель магнитного гистерезиса, измеренных на тороидах из стали 34ХНЗМ (см. рис. 12.26). Анализируя петли гистерезиса, можно отметить, что коэрцитивная сила, остаточная индукция, гистерезисные потери на перемагничивание (площадь петли гистерезиса) изменяются неоднозначно с температурой отпуска.

Причины неоднозначного изменения магнитных характеристик с температурой отпуска можно рассмотреть на примере коэрцитивной силы. При низкотемпературном отпуске (150 ... 250 °С) уменьшение коэрцитивной силы обусловлено структурно-фазовыми изменениями, характерными и для сталей первых двух групп: выделением углерода из твердого раствора и частичной релаксацией внутренних напряжений, что приводит к снижению наведенной магнитной анизотро-

пии, градиентов внутренних напряжений и тем самым облегчает процессы намагничивания и перемагничивания. Распад остаточного аустенита, приводящий к исчезновению магнитных полей рассеяния в ферромагнитной матрице, также способствует снижению H_c .

Для сталей, легированных кремнием, интервал снижения коэрцитивной силы несколько шире, чем для прочих сталей (примерно до 400 °С), что связано с задержкой процессов распада мартенсита и остаточного аустенита. В отличие от твердости, которая при низкотемпературном отпуске снижается на 10 ... 15 %, коэрцитивная сила уменьшается более чем в 2 раза (см. рис. 12.26–12.28), что свидетельствует о гораздо большей чувствительности магнитных свойств к структурным изменениям и фазовым превращениям в этом интервале температур отпуска и является предпосылкой предпочтительного использования магнитных характеристик

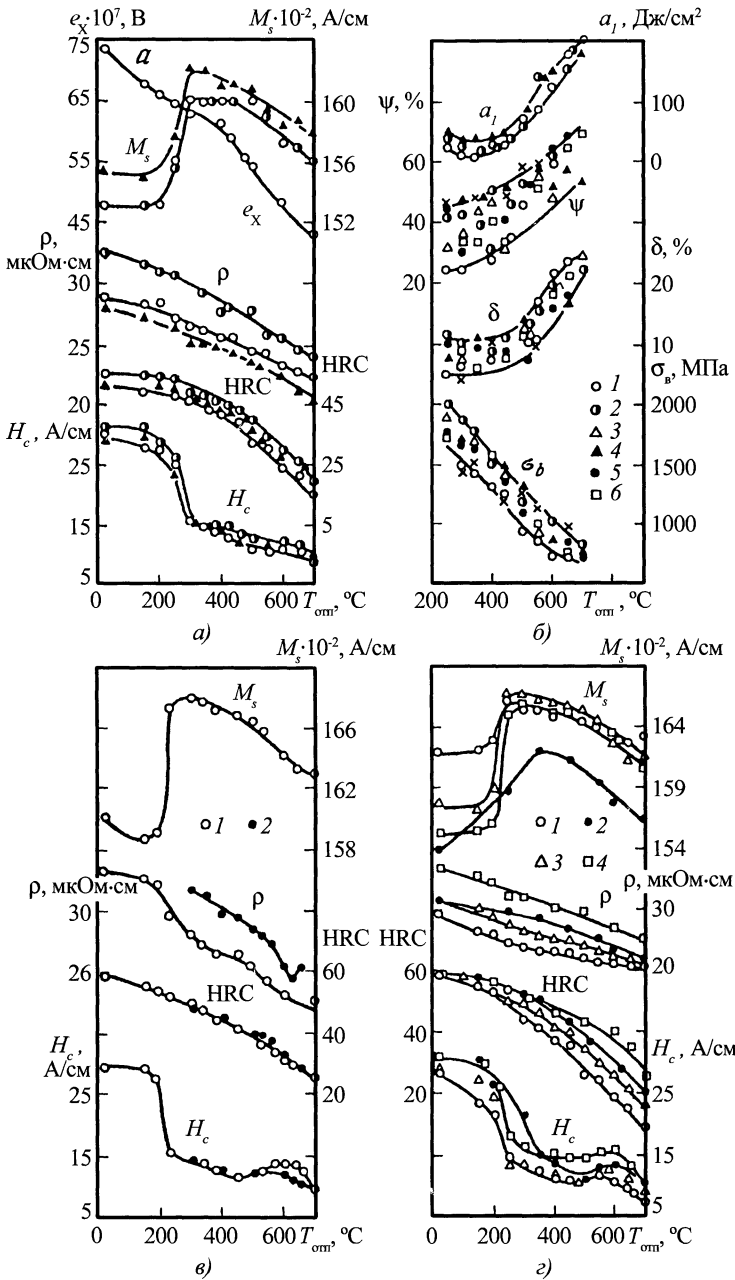


Рис. 12.27. Зависимости физико-механических характеристик сталей 3-й группы от температуры отпуска:

$a, б$ – 40X (шесть плавок; состав, %: 1 – 0,40 C, 0,26 Si, 0,57 Mn, 0,87 Cr, 0,17 Cu, 0,019 P; 2 – 0,41 C, 0,35 Si, 0,63 Mn, 0,84 Cr, 0,15 Cu, 0,017 P; 3 – 0,42 C, 0,21 Si, 0,54 Mn, 0,94 Cr, 0,06 Cu, 0,02 P; 4 – 0,43 C, 0,17 Si, 0,59 Mn, 0,83 Cr, 0,16 Cu, 0,017 P; 5 – 0,41 C, 0,22 Si, 0,59 Mn, 0,84 Cr, 0,06 Cu, 0,02 P; 6 – 0,42 C, 0,23 Si, 0,53 Mn, 0,92 Cr, 0,21 Cu, 0,025 P); δ – 40XH (1), 40XHМ (2); z – 45 (1), 45X (2), 45XH (3), 45XHМФА (4)

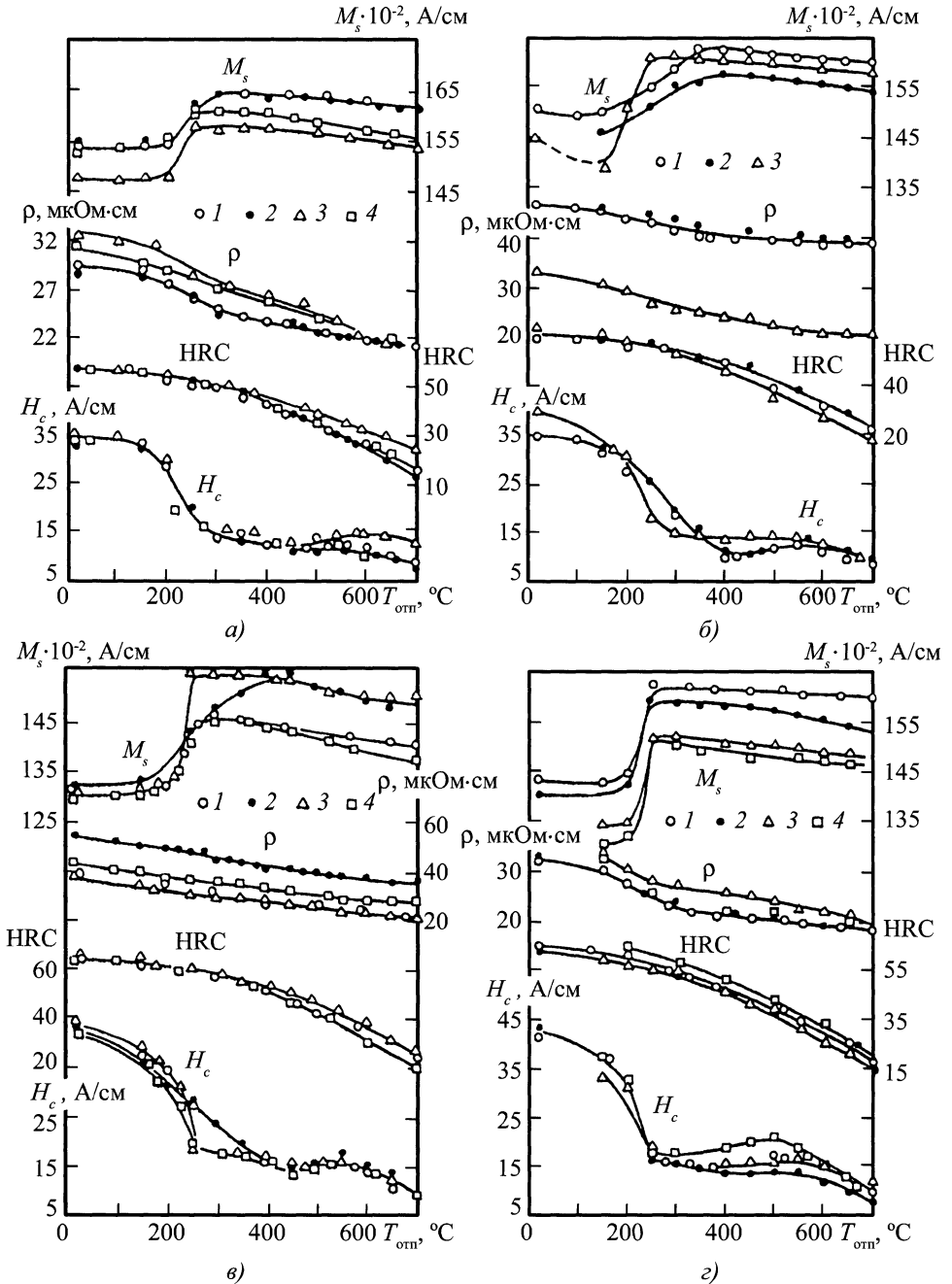


Рис. 12.28. Зависимости физико-механических характеристик закаленных сталей 3-й группы от температуры отпуска:
 а – сталь 50 (1), 50РА (2), 50ХГ (3), 50ХВА (4); б – 55С2 (1), 60С2А (2), 65Г (3);
 в – 9Х (1), 9ХС (2), ХВГ (3), ШХ15СГ (4); г – У8А (1), 8ХФ (2), У9А (3), У12 (4)

для определения структуры изделий. При низкотемпературном отпуске (250 ... 300 °С) распад мартенсита и остаточного аустенита заканчивается, за исключением сталей, легированных кремнием (см. рис. 12.28). Тетрагональность решетки α -железа продолжает уменьшаться.

Поведение коэрцитивной силы с увеличением температуры отпуска от 250 до 600 °С будет определяться соотношением таких факторов, как уменьшение внутренних напряжений, с одной стороны, и увеличение относительного объема карбидной фазы и изменение размеров карбидных частиц (кривые 1–5 на рис. 12.21), с другой. В большинстве сталей при $T_{\text{отп}} = 250 \dots 450 \text{ } ^\circ\text{C}$ H_c незначительно убывает, а при более высоких температурах отпуска начинает расти (см. рис. 12.27, в, г и 12.28, б, г). При $T_{\text{отп}} = 550 \dots 570 \text{ } ^\circ\text{C}$ коэрцитивная сила достигает максимального значения, а при дальнейшем увеличении температуры отпуска уменьшается. Для некоторых сталей значение максимума относительно невелико (см. рис. 12.27, а и 12.28, а). Причину образования максимума, по теории включений, связывают с определенной объемной концентрацией карбидных частиц в стали и достижением ими в процессе коагуляции критического размера.

Из анализа поведения коэрцитивной силы в области средних и высоких температур отпуска выявить какие-либо закономерности в местоположении максимума и его значения в зависимости от химического состава сталей не представляется возможным, но можно отметить, что максимум в основном приходится на область температур отпуска 500 ... 600 °С. Его значение слабо зависит от содержания углерода, но в некоторой степени определяется легирующими элементами. Стали, содержащие легированный цементит или специальные карбиды, имеют более мелкие включения, и для них характерен менее выраженный максимум H_c .

Изменение намагниченности насыщения, происходящее при отпуске сталей в интервале 200 ... 300 °С, вызвано распадом парамагнитного остаточного аустенита на ферромагнитные продукты – отпущенный мартенсит и карбиды. Относительный рост намагниченности насыщения определяется количеством остаточного аустенита в стали, которое зависит от содержания углерода и других легирующих элементов. Например, в стали 40X (см. рис. 12.27, а) содержится 4 ... 5 % остаточного аустенита, в то время как в хромистых сталях с большим количеством углерода 9XC и ШХ15СГ (см. рис. 12.28, в) может находиться до 17 % аустенита. В легированных сталях, особенно с добавками кремния, интервал распада остаточного аустенита более широкий и смещен в область высоких температур отпуска. Наглядно это можно проследить на примере сталей 55C2, 60C2A, 9XC (см. рис. 12.28, б, в).

После достижения некоторого максимального значения намагниченность насыщения начинает понижаться. Основной причиной снижения M_s , по-видимому, может быть образование цементита вследствие карбидного превращения. Можно отметить три возможные причины снижения намагниченности насыщения при среднем и высокотемпературном отпусках:

1) образование парамагнитного цементита за счет углерода, выделившегося из твердого α -раствора;

2) переход ферромагнитного низкотемпературного карбида $\varepsilon\text{-Fe}_x\text{C}$ в парамагнитный цементит, или так называемый промежуточный карбид (близкий по структуре, составу и свойствам к цементиту);

3) переход атомов железа из ферромагнитного состояния (твердый α -раствор) в парамагнитное (парамагнитный цементит) при содержании углерода в ε -карбиде больше, чем в цементите.

Удельное электрическое сопротивление монотонно понижается с увеличением температуры отпуска. Основными структурными изменениями, которые приводят к уменьшению ρ , являются следующие процессы: выделение углерода из твердого α -раствора, распад остаточного аустенита, снижение внутренних напряжений, а также коагуляция карбидов и рекристаллизация. Относительное изменение удельного электрического сопротивления при повышении температуры отпуска невелико и возрастает с увеличением в стали количества углерода. Изменение ρ в интервале температур отпуска 20 ... 700 °С для стали 40X (см. рис. 12.27, а) составляет примерно 20 %, для стали 50РА – 30 % (см. рис. 12.28, а) и для стали У12 – 50 % (см. рис. 12.28, з).

Для стали 40X (см. рис. 12.27, а) ЭДС Холла e_H уменьшается во всем диапазоне температур отпуска. Если учесть, что намагниченность насыщения незначительно изменяется с температурой отпуска, то зависимость e_H от $T_{\text{отп}}$ в основном должна определяться теми же механизмами, что и зависимость удельного электрического сопротивления от температуры отпуска. В целом характер зависимости $e_H(T_{\text{отп}})$ близок к зависимости $\rho(T_{\text{отп}})$. Однако относительное изменение $e_H(T_{\text{отп}})$ практически в 2 раза больше, чем $\rho(T_{\text{отп}})$.

Влияние колебаний химического марочного состава на магнитные, электрические и прочностные характеристики сталей можно проследить на примере исследований шести плавок стали 40X (см. рис. 12.27, а, б). Наиболее чувствительной характеристикой к колебаниям химического состава является удельное электрическое сопротивление. Коэрцитивная сила чувствительна к вариациям химического состава практически в тех же пределах, что и твердость, причем увеличение содержания углерода в плавке приводит в равной мере к повышению как твердости, так и коэрцитивной силы.

12.4.5. Высоколегированные стали

Структурные изменения, протекающие при отпуске высоколегированных сталей (4-я группа), несмотря на схожесть, несколько отличаются от превращений, происходящих при отпуске в углеродистых сталях.

Легирующие элементы при отпуске закаленной легированной стали замедляют протекание фазовых превращений и структурных изменений и смещают их в область более высоких температур. При большом содержании карбидообразующих элементов скорость коагуляции карбидных частиц заметно падает. Остаточный аустенит и мартенсит не распадаются до высоких температур отпуска (500 ... 550 °С), хотя некоторое количество углерода из мартенсита выделяется, образуя метастабильный цементит. Выделение специальных карбидов из мартенсита и остаточного аустенита сопровождается повышением твердости (вторичное твердение). При высоких температурах отпуска обедненный углеродом и легирующими элементами остаточный аустенит в процессе охлаждения претерпевает вторичное мартенситное превращение, что может привести к повышению твердости.

Диффузия углерода в сталях 20X13, 30X13 и X12Ф1, легированных большим количеством хрома, затруднена, вследствие чего вторая, третья и частично четвертая стадии превращений при отпуске начинают интенсивно протекать при 480 ... 600 °С. При $T_{\text{отп}} = 150 \dots 480$ °С значительных изменений физико-механических свойств не происходит (рис. 12.29). Уменьшение удельного электрического сопротивления при $T_{\text{отп}} = 150 \dots 480$ °С связано с выделением небольшого количества углерода из решетки мартенсита и частичным снижением внутренних микронапряжений. Однако уменьшение содержания углерода в твердом растворе практически не влияет на твердость. Коэрцитивная сила при выделении углерода и частичной релаксации внутренних на-

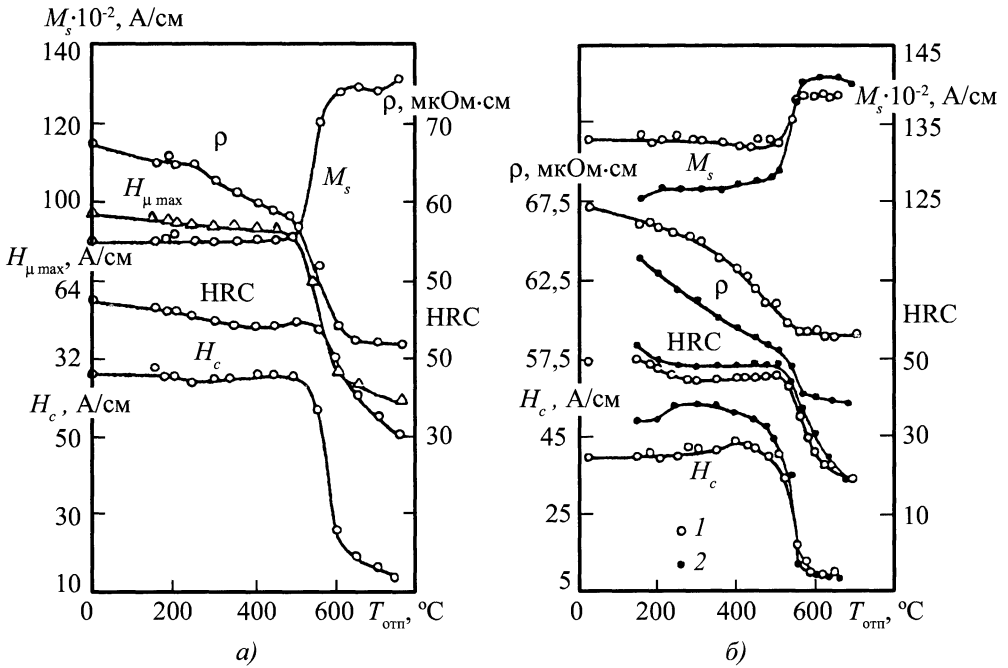


Рис. 12.29. Зависимости физико-механических характеристик высокохромистых сталей от температуры отпуска:
 а – X12Φ1, закаленная от 1050 °С; б – 20X13 (1) и 30X13 (2), закаленные от 1010 и 1020 °С соответственно

пряжений должна несколько уменьшаться, но появление при 250 ... 350 °С метастабильного карбида цементитного типа, играющего роль мелкодисперсных неферромагнитных включений, затрудняет процессы перемагничивания. Под действием двух противоположных по влиянию факторов структурно-чувствительные магнитные свойства практически не изменяются.

Основные структурно-фазовые изменения в высокохромистых сталях протекают при $T_{отп} = 480 \dots 600$ °С. При этих температурах отпуска происходит распад остаточного аустенита и намагниченность насыщения повышается. Превращение мартенсита, интенсивно протекающее в этих условиях, приводит к образованию α -фазы с практически кубической решеткой и карбидов типа $Me_{23}C_6$. Коэрцитивная сила, поле максимальной магнитной проницаемости и удельное электрическое

сопротивление при этом существенно уменьшаются, а максимальная магнитная проницаемость увеличивается. Изменение магнитных и электрических свойств вызвано тем, что углерод интенсивно выделяется из перенасыщенного твердого раствора (тетрагональность решетки твердого α -раствора уменьшается), что снижает эффективную магнитную анизотропию. Влияние внутренних напряжений на поведение H_c и ρ в указанном интервале температур оценить трудно, так как закалочные напряжения хотя и снижаются, но сохраняются когерентные и возникают дисперсионные напряжения (см. рис. 12.21, кривые 3, 4), связанные с образованием специальных карбидов. Распад остаточного аустенита способствует снижению H_c , поскольку увеличивается магнитная однородность ферромагнитной матрицы. Удельное электрическое сопротивление при этом тоже будет снижаться, пос-

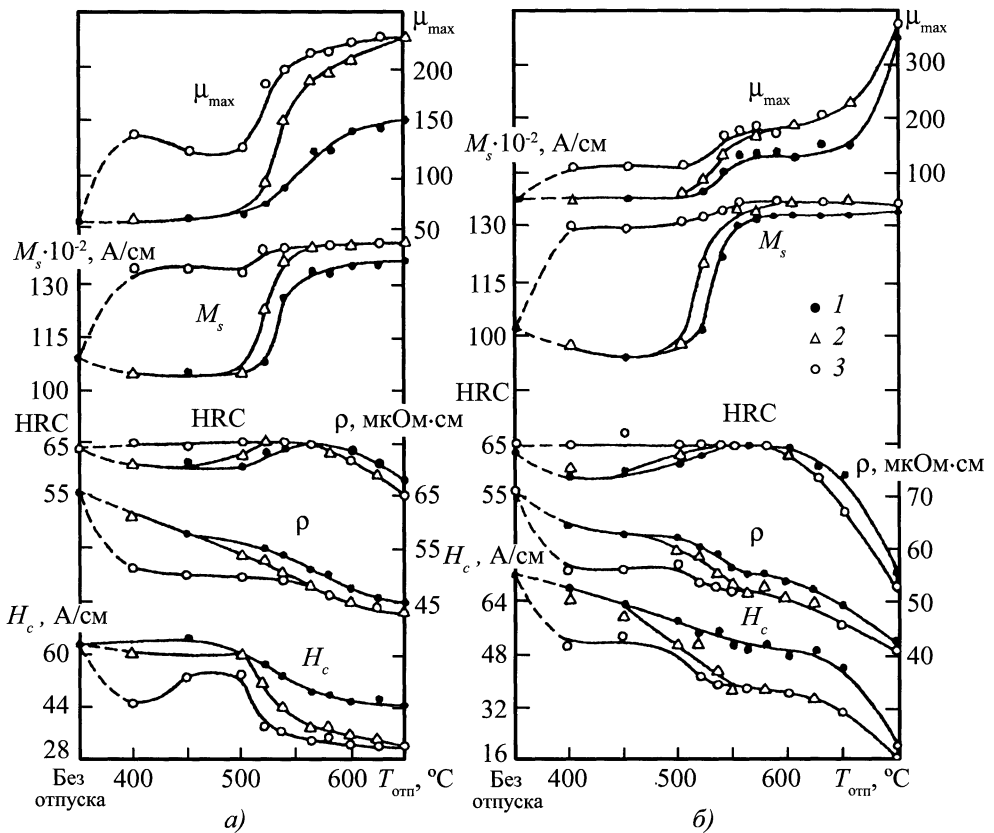


Рис. 12.30. Зависимости физико-механических характеристик закаленных в масле ($t = 60^\circ\text{C}$) и отпущенных сталей от температуры отпуска:

a – сталь Р6МЗ, $T_{\text{зак}} = 1210^\circ\text{C}$, $T_{\text{отп}} = 560^\circ\text{C}$; *б* – сталь Р6М5, $T_{\text{зак}} = 1220^\circ\text{C}$, $T_{\text{отп}} = 550^\circ\text{C}$;
1, 2, 3 – первый, второй, третий отпуск соответственно

колку значение ρ для аустенита больше, чем для мартенсита.

Характер изменения магнитных свойств при $T_{\text{отп}} = 600 \dots 700^\circ\text{C}$ определяется, с одной стороны, уменьшением искаженности α -фазы, что должно сопровождаться снижением H_c , и, с другой стороны, процессами коагуляции карбидных частиц, что будет вызывать рост H_c . Хром и ванадий, присутствующие в сталях, снижают скорость диффузии углерода, поэтому коагуляция карбидных частиц замедляется. Можно предположить, что в случае легирования сталей хромом

($\approx 13\%$) карбидные частицы при указанных температурах критического размера не достигают, поэтому с ростом размеров включений магнитная жесткость будет возрастать. Различное влияние двух указанных выше факторов, по всей вероятности, и обуславливает слабое изменение магнитных характеристик при этих температурах отпуска. Ванадий в стали Х12Ф1 способствует сохранению мелкого зерна. Эта сталь имеет существенно более высокую твердость и большее значение H_c , а также содержит большое количество остаточного аустенита (см. рис. 12.29, а).

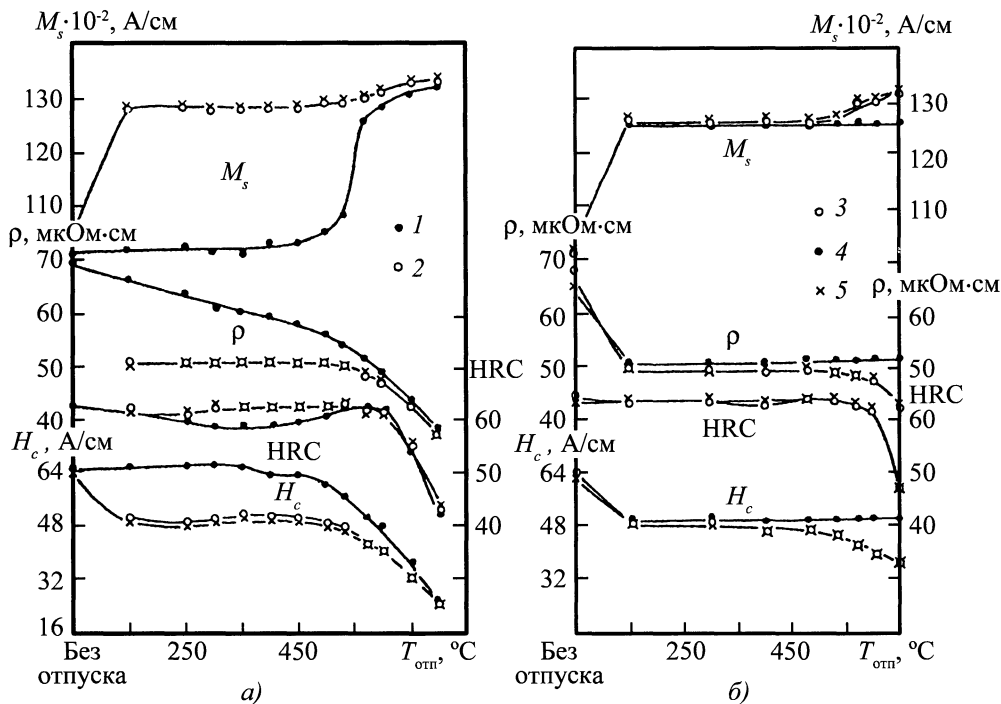


Рис. 12.31. Зависимости физико-механических характеристик стали P18, закаленной от 1250 °С в масле ($t = 20$ °С), от температуры первого (а), второго (б) отпусков и старения при 170 °С (б) (время выдержки при отпуске – 1 ч, время старения – 5 ч)

Широко распространенным классом высоколегированных сталей являются быстрорежущие стали на основе вольфрама с добавками Cr, Mo, V, Co и других элементов.

Рис. 12.30 и 12.31 иллюстрируют изменение физико-механических свойств ряда сталей в зависимости от температуры отпуска. При низкотемпературном отпуске (150 ... 250 °С) в быстрорежущих сталях происходит частичное выделение углерода из мартенсита в виде высокодисперсных карбидов железа и уменьшается тетрагональность решетки. Эти структурные изменения практически не влияют на прочностные и магнитные свойства сталей, только удельное электрическое сопротивление заметно убывает при этих температурах отпуска (см. рис. 12.31, а,

кривые 1).

При $T_{отп} = 300 \dots 500$ °С происходит частичная релаксация внутренних микронапряжений и продолжается дальнейшее выделение углерода из мартенсита. В результате образуются карбиды цементитного типа, при этом появляются дисперсионные напряжения (см. рис. 12.21, кривая 4). Отпуск до $T_{отп} = 350 \dots 400$ °С сопровождается уменьшением твердости на 3 ... 5 ед. HRC (см. рис. 12.31, а, кривые 1). Затем при $T_{отп} = 400 \dots 500$ °С твердость опять возрастает, поскольку происходит превращение некоторой части цементитного карбида в специальный дисперсный карбид хрома. Структурно-чувствительные магнитные характеристики до $T_{отп} = 500 \dots 550$ °С практически не изменяются (см. рис. 12.30, 12.31, а, кри-

вые 1). Это определяется тем, что, с одной стороны, выделение углерода и частичная релаксация микронапряжений способствуют снижению H_c , а с другой, – образование дисперсных парамагнитных карбидов и появление дисперсионных микронапряжений, а также существование цементитных выделений должны повышать H_c . Удельное электрическое сопротивление по мере увеличения температуры отпуска продолжает снижаться, так как выделение углерода приводит к увеличению проводимости твердого раствора.

При нагреве стали до $T_{\text{отп}} = 500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ одновременно с распадом мартенсита происходит частичное превращение остаточного аустенита (см. рис. 12.30, 12.31, а, кривые M_s) в мартенсит с выделением из твердого раствора мелкодисперсных специальных карбидов, а обедненный углеродом и легирующими элементами аустенит при охлаждении превращается во вторичный мартенсит. Твердость при указанных температурах достигает максимального значения вследствие исчезновения менее твердой фазы – аустенита и образования дисперсных карбидов. Все магнитные характеристики сталей при этих температурах отпуска претерпевают существенные изменения (см. рис. 12.30, 12.31, а).

Дальнейшее повышение температуры отпуска до $640 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к полному распаду мартенсита, и параметры его решетки уменьшаются до значений параметров α -фазы отожженной стали. При $T_{\text{отп}} = 600 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит коагуляция выделившихся карбидов: игольчатые карбиды достигают длины $20 \dots 30 \text{ нм}$, а глобулярные карбиды имеют размеры $40 \dots 100 \text{ нм}$. Эти процессы приводят к разупрочнению, при этом коэрцитивная сила и удельное электрическое сопротивление уменьшаются, максимальная магнитная проницаемость растет и практически остается без изменения значение термоЭДС.

Высоколегированный остаточный аустенит быстрорежущих сталей очень ус-

тойчив к распаду, поэтому при первом отпуске он распадается не полностью. Для наиболее полного превращения остаточного аустенита в мартенсит быстрорежущие стали подвергают второму отпуску при температурах $550 \dots 570 \text{ }^\circ\text{C}$, который сопровождается дополнительным незначительным распадом остаточного аустенита для сталей Р6М5 и Р6М3 (см. рис. 12.30, кривые 2) и более существенным для стали Р18 (см. рис. 12.31, а, кривые 3). Одновременно с этим для образцов, отпущенных при $T_{\text{отп}} = 150 \dots 570 \text{ }^\circ\text{C}$, при втором отпуске происходит распад мартенсита. Эти два процесса в основном и определяют поведение физических свойств стали при вторичном отпуске. Характер изменения твердости после второго отпуска в интервале температур первого отпуска $150 \dots 570 \text{ }^\circ\text{C}$ тот же, хотя ее значение немного возрастает по отношению к первому отпуску (см. рис. 12.30, кривые 2 и 12.31, а, кривая 2). Удельное электрическое сопротивление, коэрцитивная сила при втором отпуске уменьшаются по сравнению со значениями H_c и ρ , полученными при первом отпуске, однако существенных отличий в характере зависимости перечисленных выше свойств от температуры первого отпуска не наблюдается (см. рис. 12.30, кривые 2 и рис. 12.31, а, кривые 2).

Третий отпуск при температурах $560 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали Р6М3 и $550 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали Р6М5 приводит к повышению M_s , снижению H_c и ρ в интервале температур $400 \dots 450 \text{ }^\circ\text{C}$ первого отпуска (см. рис. 12.30). Старение при $170 \text{ }^\circ\text{C}$, необходимое для снятия внутренних напряжений, возникающих при распаде остаточного аустенита, практически не влияет на магнитные, электрические свойства и твердость стали Р18 (см. рис. 12.31, а, кривые 5).

При контроле качества термической обработки быстрорежущих сталей возможны случаи нарушения технологии второго отпуска. На примере стали Р18 рассмотрены закономерности изменения

физических свойств после закалки, первого отпуска при 570 °С и вариации температуры второго отпуска. Все рассмотренные физические характеристики (H_c , ρ , HRC, M_s) мало изменяются вплоть до температуры второго отпуска 480 ... 500 °С (см. рис. 12.31, б, кривые 4), хотя следует отметить, что кривые H_c и ρ после второго отпуска расположены ниже кривых H_c и ρ , соответствующих первому отпуску. При увеличении температуры второго отпуска выше 520 °С происходит дополнительный распад остаточного аустенита, что подтверждается увеличением намагниченности насыщения (см. рис. 12.31, б, кривые 3). Распад остаточного аустенита приводит к снижению удельного электрического сопротивления и коэрцитивной силы. Значение H_c уменьшается в связи с исчезновением неферромагнитных включений в ферромагнитной матрице, роль которых выполнял остаточный аустенит. Поскольку состав мартенсита, полученного при первом отпуске, при втором отпуске до $T_{отп} = 600$ °С практически не изменяется, то твердость стали остается постоянной, и только при температурах выше 600 °С значение HRC убывает.

12.4.6. Мартенситно-старяющие, аустенитно-мартенситные и ферритно-аустенитные стали специального назначения

Для сталей 5-й группы общности закономерностей изменения структурно-чувствительных магнитных свойств не наблюдается, однако их рассмотрение полезно при решении конкретных задач НК изделий.

Мартенситно-старяющие стали. Упрочнение мартенситно-старяющих сплавов связано с начальными стадиями образования интерметаллидных фаз при старении. Выделению стабильных фаз предшествуют так называемая зонная стадия распада твердого раствора (образование зон Гинье–Престона или сегрегаций, обогащенных атомами легирующих элементов, ко-

торые служат зародышами выделяющейся фазы) и образование промежуточных фаз, когерентно или полуккогерентно связанных с матрицей. Повышение прочностных характеристик (рис. 12.32, кривые HRC, σ_b) при температурах старения 300 ... 450 °С связывают с зонной стадией распада твердого раствора, так как никаких изменений в структуре кристаллов мартенсита не наблюдается. В большинстве железоникелевых сплавов происходит лишь незначительное уменьшение плотности дислокаций. Образующиеся сегрегации атомов легирующих элементов имеют размеры, не превышающие 0,004 ... 0,006 мкм. В исследованных сталях, по-видимому, как и в железоникелевых сплавах с 18 % Ni, легированных молибденом и титаном, на стадии максимального упрочнения (480 ... 500 °С) и в перестаренном состоянии присутствуют частицы Fe_2Mo , Ni_3Mo и Ni_3Ti .

Магнитные свойства в интервале температур 20 ... 500 °С практически не изменяются (см. рис. 12.32). Незначительное снижение коэрцитивной силы и остаточной индукции тела B_r' в диапазоне 300 ... 400 °С объясняется уменьшением плотности дислокаций и снижением микронапряжений в мартенсите. При температурах старения 400 ... 500 °С уменьшение H_c за счет отмеченных факторов компенсируется ее ростом вследствие образования промежуточных интерметаллидных фаз. Уменьшение ρ при температурах старения 300 ... 500 °С, вероятнее всего, связано с уменьшением плотности дислокаций и периодическим расположением зон (образованием модулированной структуры) в объеме сплава. При температурах 400 ... 500 °С на уменьшение ρ влияют распад твердого раствора и частичная релаксация микронапряжений в матрице.

Разупрочнение исследованных сталей при температурах старения, превышающих 500 °С, определяется протеканием нескольких процессов: коагуляцией час-

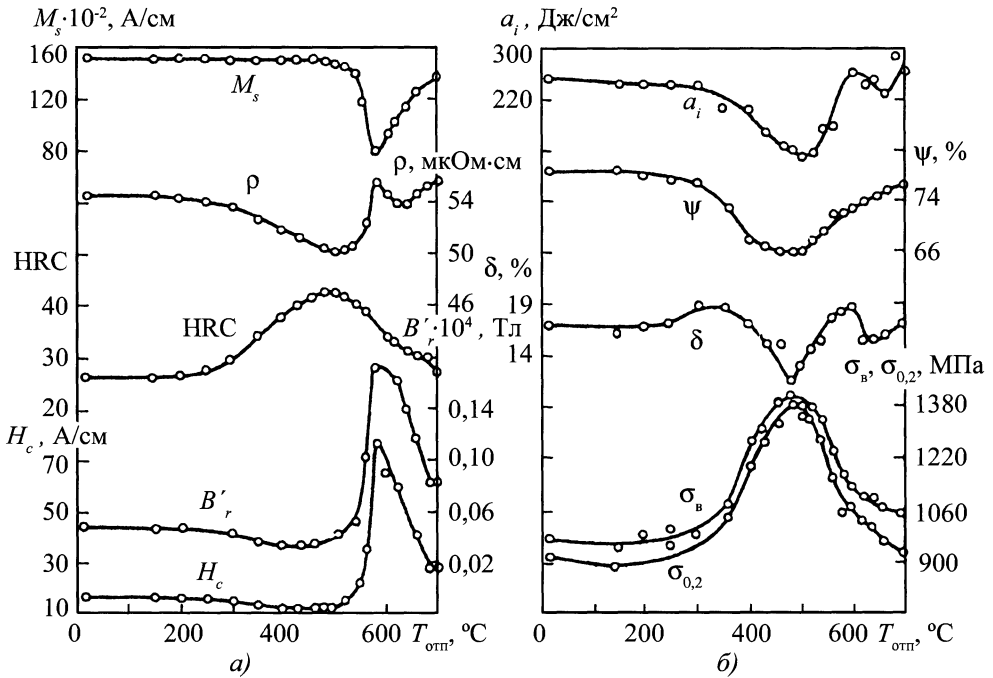


Рис. 12.32. Зависимости физико-механических характеристик стали ЧС5В1, закаленной от 820 °С на воздухе, от температуры отпуска (время выдержки при отпуске – 3 ч)

тиц, образованием стабилизированного аустенита и "свежего" мартенсита. Поведение исследуемых физических свойств при температурах старения, превышающих 500 °С, в основном связано с образованием аустенита, обогащенного никелем. Максимальное количество стабилизированного аустенита в структуре состаренных сталей образуется при $T_{отп} = 580$ °С, что приводит к уменьшению намагниченности насыщения, повышению коэрцитивной силы, остаточной индукции тела B'_r , удельного электрического сопротивления в интервале 500 ... 580 °С (см. рис. 12.32). Коагуляция интерметаллидных фаз и релаксация напряжений в α -фазе должны приводить к снижению ρ . Однако действие этих факторов на величину ρ перекрывается более сильным эффектом – увеличением количества стабилизированного аустенита в сплаве. При-

чину магнитной жесткости мартенситно-старяющихся сталей в интервале температур обратного $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -превращения связано с переманичиваем участков α -фазы без магнитного взаимодействия между ними, что является результатом большого содержания в стали остаточного аустенита.

При температурах старения выше 580 °С эффект стабилизации аустенита уменьшается, что приводит к повышению M_s и снижению ρ , H_c и B'_r (см. рис. 12.32, а). Уменьшение количества аустенита в структуре стали сопровождается снижением удельного электрического сопротивления только до температуры старения 640 °С. Несмотря на то, что количество аустенита при 640 °С уменьшается примерно вдвое по сравнению с состоянием при 580 °С, изменение ρ невелико. Это, по-видимому, обусловлено блочной структурой с более высокой степенью

дисперсности кристаллов вновь образованного мартенсита, в результате чего рассеяние электронов проводимости может возрасти. Кроме того, в интервале температур 600 ... 700 °С возрастает степень легирования твердого раствора мартенсита никелем и элементами, ранее входившими в состав интерметаллидных фаз (титаном, молибденом, алюминием и др.), что также может привести к увеличению удельного электросопротивления.

Высокая прочность мартенситно-старееющих сталей объясняется не только дисперсностью и равномерным распределением частиц второй фазы, а также их собственной высокой прочностью. Старение мартенсита вызывает существенное снижение пластичности и ударной вязкости. Однако эти характеристики на стадии максимального упрочнения остаются еще достаточно высокими.

Аустенитно-мартенситные стали переходного класса упрочняются путем превращения аустенита в мартенсит и последующего его старения, что обеспечивает высокие механические свойства. Среди высокопрочных сталей хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств обладает коррозионно-стойкая сталь 13X15H4AM3-Ш. Для получения высокой вязкости сталь подвергают закалке от температуры 1070 °С, при которой обеспечивается полное растворение карбидов. Мартенситное превращение начинается при 50 ... 90 °С, и после обработки холодом при -70 °С в структуре стали образуется 80 ... 85 % мартенсита. Наибольшую прочность сталь приобретает после отпуска при 200 и 450 °С. Отпуск при 350 °С понижает прочность.

Снижение прочности и удельного электрического сопротивления при отпуске до 300 °С связывают с уменьшением концентрации углерода и азота в мартенсите. При $T_{\text{отп}} = 100 \dots 500$ °С фазовый состав стали 13X15H4AM3-Ш не изменяется (см. рис. 12.33, а, кривая M_s) и в структуре стали присутствует 15 ... 20 %

равномерно распределенного остаточного аустенита, что обуславливает высокую ударную вязкость. Коэрцитивная сила и остаточная индукция в интервале температур 100 ... 300 °С практически не изменяются, поскольку значительных фазовых и структурных изменений не происходит. При этих температурах отпуска внутренние микронапряжения и плотность дислокаций практически не уменьшаются. Снижение H_c и B'_r при более высоких температурах вызвано уменьшением микронапряжений, некоторым понижением плотности дислокаций и, возможно, нарушением когерентной связи выделившейся фазы с матрицей. После отпуска при 450 ... 500 °С в исследуемой стали наблюдается выделение второй фазы, которую отождествляют с высокодисперсными частицами карбонитрида хрома, близкого по параметрам к нитриду Cr_2N . Выделение этой фазы, по-видимому, несколько затормаживает снижение H_c и B'_r . По данным рентгеноструктурного анализа, при $T_{\text{отп}} = 550 \dots 600$ °С выделяются частицы карбонитрида хрома, а при 650 ... 700 °С – частицы $Me_{23}C_6$.

Повышение прочности в интервале температур 350 ... 500 °С (см. рис. 12.33, б) и значительное уменьшение работы распространения трещины связаны только с упрочняющим действием дисперсных частиц, поскольку снижение плотности дислокаций и выделение атомов внедрения из твердого раствора должны приводить к разупрочнению стали.

При температурах отпуска выше 560 °С на распад мартенсита накладывается обратное $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -превращение. Отпуск выше 600 °С сопровождается повышением содержания остаточного аустенита, количество которого достигает максимального значения при $T_{\text{отп}} = 625 \dots 650$ °С (см. рис. 12.33, а, кривые M_s). Эффект стабилизации остаточного аустенита при этих температурах отпуска связывают с фазовым наклепом аустенита или с образова-

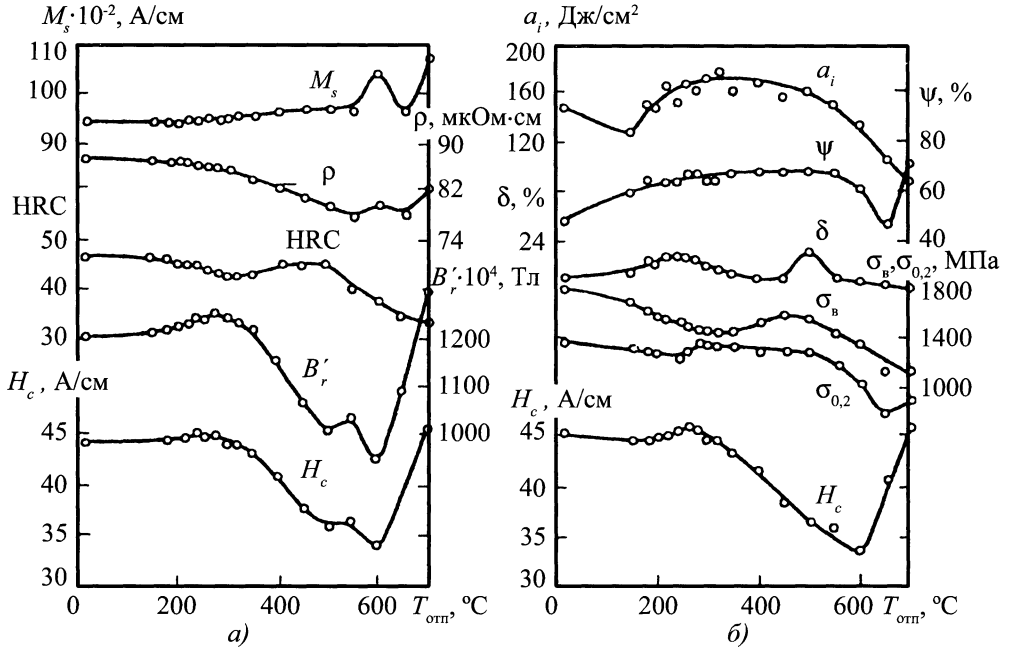


Рис. 12.33. Зависимости физико-механических характеристик стали 13X15N4AM3-Ш, закаленной от 1070 °С в воде ($t = 20$ °С), от температуры отпуска (время выдержки при отпуске – 2 ч)

нием высоконикелевого аустенита. Дальнейшее повышение температуры вновь вызывает уменьшение количества стабильного аустенита.

Увеличение коэрцитивной силы и остаточной индукции тела при температурах отпуска выше 600 °С вызвано ростом объема карбидной фазы и достижением частицами критического размера примерно 0,1 мкм. Частицы карбидной фазы располагаются преимущественно на границах раздела мартенсит–мартенсит и мартенсит–аустенит. Крупные карбиды расположены на границах исходных (высокотемпературных) зерен аустенита, что и вызывает снижение прочностных характеристик и ударной вязкости при температурах выше 500 °С.

Ферритно-аустенитные стали. Двухфазные ферритно-аустенитные стали со структурой δ -феррит–аустенит обладают более высоким сопротивлением некото-

рым видам коррозии по сравнению с чисто аустенитными и чисто ферритными коррозионно-стойкими сталями и поэтому находят все большее применение. Однако при больших содержаниях δ -феррита эти стали имеют высокую склонность к хрупкому разрушению. Один из возможных путей управления качеством изготовления сталей – использование неразрушающих методов контроля.

На рис. 12.34 приведены закономерности изменения физико-механических свойств в зависимости от температуры отжига сложнелегированной низкоуглеродистой хромоникелевой стали, содержащей 0,05 % С, 24 % Cr, 7 % Ni и ряд других элементов. В исходном состоянии (без термической обработки) сталь обладает низким сопротивлением хрупкому разрушению ($a_i \approx 10$ Дж/см²). После закалки от 1150 °С ударная вязкость возрастает до 100 Дж/см². Нагрев при температурах

500 ... 700 °С приводит к уменьшению значения a_i примерно в 2 раза. Особенно сильный эффект охрупчивания наблюдается после отжига в диапазоне температур 800 ... 900 °С. Отжиг при 1250 °С также приводит к значительному падению ударной вязкости. Разрушение во всех случаях происходит по телу зерна.

Таким образом, существует несколько температурных интервалов повышенной склонности к хрупкому разрушению. Охрупчивание при 500 ... 600 °С сопровождается ростом твердости. При этом можно отметить небольшое уменьшение удельного электрического сопротивления. Такое изменение свойств указывает на протекание процессов распада легированного феррита с выделением интерметаллидных фаз высокой степени дисперсности. Не исключено, что охрупчивание стали в этом интервале температур частично вызвано процессами, приводящими к хрупкости при 475 °С.

После выдержки при 900 °С наблюдаются повышение твердости и снижение удельного электрического сопротивления. Можно отметить отсутствие корреляции между твердостью, электрическим сопротивлением и ударной вязкостью. При температуре 800 °С снижение ударной вязкости не сопровождается ощутимыми изменениями твердости и сопротивления, в то время как при 900 °С минимальному значению ударной вязкости соответствует экстремальные значения этих характеристик. Исследования нескольких промышленных плавок этой же стали показали, что охрупчивание в области температур 800 ... 900 °С может вообще не сопровождаться приростом твердости.

Изучение микроструктуры образцов в литом состоянии, а также после отжига при температурах 800 и 900 °С показало, что во всех указанных случаях наблюдается образование σ -фазы, которая выделяется в ферритной составляющей преимущественно в приграничных областях с γ -фазой. Образование богатой хромом σ -фазы приводит к изменению состава окружаю-

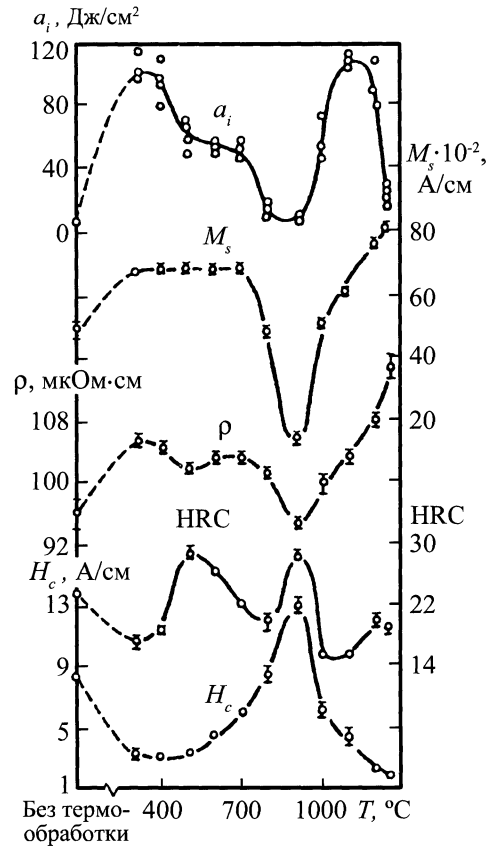


Рис. 12.34. Зависимости физико-механических характеристик ферритно-аустенитной стали от температуры отжига (предварительная обработка – закалка от 1150 °С)

щего ее феррита, который в соответствии с диаграммой состояния превращается в аустенит. Образование вторичного аустенита (γ' -фазы), как правило, не сопровождается падением ударной вязкости, а в некоторых случаях даже может приводить к снижению критической температуры хрупкости. Основной причиной охрупчивания стали в интервале 800 ... 900 °С является образование σ -фазы. Появление в двухфазной стали близкого состава σ -фазы (3 ... 5 %) приводит к снижению ударной вязкости на порядок.

При изучении зависимости магнитных свойств от температуры нагрева уста-

новлено, что намагниченность насыщения нечувствительна к процессам, протекающим при нагреве до 700 °С (см. рис. 12.34), что связано, по-видимому, с небольшим количеством выделяющихся при этих температурах фаз. Повышение температуры приводит к сильному снижению намагниченности насыщения, которая достигает минимального значения при температуре 900 °С. Уменьшение M_s обусловлено распадом δ -феррита на неферромагнитные σ -фазу и вторичный аустенит, а глубина образовавшегося минимума характеризует их суммарное количество. С повышением температуры значение M_s возрастает, что связано с увеличением количества ферритной фазы.

При температурах выше 1200 °С структура стали становится полностью однофазной (ферритной), резко возрастает размер ферритного зерна. При этом происходит некоторое повышение твердости стали, которое свидетельствует об обогащении твердого раствора легирующими элементами (в том числе примесями внедрения – углеродом, азотом) в результате растворения при этих температурах избыточных карбидных и нитридных фаз. Вероятно, увеличение размеров ферритного зерна, повышение легированности твердого раствора и обогащение границ охрупчивающими элементами – основные причины хрупкости феррита при $T > 1200$ °С.

Коэрцитивная сила до температуры 500 °С практически не изменяется, хотя для 450 ... 500 °С характерно образование интерметаллидов. При дальнейшем увеличении температур происходит рост коэрцитивной силы, вызванной появлением σ -фазы и вторичного аустенита. При нагреве выше 900 °С коэрцитивная сила достигает максимального значения. Поскольку при этой температуре в стали содержится большое количество остаточного аустенита, можно предположить, что участки ферромагнитной фазы (δ -феррит) в значительной степени обособлены и перематничиваются, не взаимодействуя друг с

другом. В этом случае значение H_c будет зависеть от размеров участков δ -феррита в аустенитной матрице, а также от наличия в δ -феррите σ -фазы определенной степени дисперсности. Поэтому величина максимума H_c и температурный интервал, в котором он наблюдается, в соответствии с теорией включений будут определяться не только количеством δ -феррита, но и объемом и степенью дисперсности σ -фазы в нем.

На промышленных плавках стали было обнаружено, что максимум коэрцитивной силы не всегда соответствовал минимуму намагниченности насыщения. Однако во всех случаях максимум H_c совпадал с минимумом на кривой ударной вязкости, тогда как минимум M_s мог соответствовать либо минимуму ударной вязкости (900 °С), либо ее максимуму, который в случае промышленных плавков приходился на $T = 1000$ °С.

Хрупкости, обусловленной ростом зерна и повышением степени легированности твердого раствора (выше 1200 °С), соответствует значение коэрцитивной силы, которое более чем в 2 раза меньше H в исходном состоянии (закалка от 1150 °С).

Повышенная хрупкость стали в литом состоянии, по-видимому, также обусловлена главным образом присутствием σ -фазы и увеличенным значением коэрцитивной силы.

12.4.7. Магнитный структурный анализ закаленных и отпущенных изделий

Для низкоуглеродистых, низко- и среднелегированных конструкционных сталей с содержанием углерода менее 0,3 % характерно монотонное изменение всех рассмотренных физических характеристик при изменении температуры отпуска, поэтому для целей НК прочностных свойств и структурного состояния можно использовать любую из них. Наиболее предпочтительной и широко используе-

мой на практике является коэрцитивная сила. При низкотемпературном отпуске коэрцитивная сила претерпевает большее изменение, нежели прочностные характеристики, что позволяет получить более достоверную информацию о структурном состоянии стали при отпуске. Некоторая сложность в определении твердости может возникнуть при высокотемпературном отпуске в сталях, для которых характерно образование легированного аустенита, очень устойчивого к распаду (см. рис. 12.23, б, сталь 12ХН3А). Для таких сталей коэрцитивная сила при высокотемпературном отпуске растет, а твердость продолжает понижаться. Поскольку намагниченность насыщения довольно сильно изменяется, то контроль высокотемпературного отпуска можно осуществить по двум магнитным параметрам: намагниченности насыщения и коэрцитивной силе. Частичная закалка, которая наблюдается при высоких температурах отпуска (см. рис. 12.23) для ряда сталей этой группы, приводит как к увеличению твердости, так и к возрастанию коэрцитивной силы, что накладывает ограничения на возможности оценки качества отпуска изделий из этих сталей как магнитными, так и механическими способами.

Качество низкотемпературного отпуска изделий из сталей 2-й и 3-й групп, как и в случае сталей 1-й группы, можно проконтролировать с использованием любых рассмотренных магнитных характеристик. Как уже отмечалось, стали 2-й и 3-й групп характеризуются тем, что для большинства магнитных свойств в области средних и высоких температур отпуска не наблюдается однозначной взаимосвязи между магнитными свойствами и температурой отпуска (прочностными характеристиками). Следовательно, неразрушающее определение структурного состояния и прочностных свойств изделий из сталей

этих групп после закалки и средне- и высокотемпературного отпуска по значениям коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости, поля максимальной магнитной проницаемости, остаточной индукции, потерь энергии на перемагничивание и ряда других магнитных характеристик кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса не представляется возможным.

Для стали 4-й группы интервал возможного контроля структурно-фазового состояния и прочностных свойств совпадает с узким диапазоном температур, при которых происходит распад мартенсита и остаточного аустенита.

Для изделий из стали 5-й группы контроль качества закалки и последующего отпуска возможен в отдельных температурных интервалах с использованием двух параметров: намагниченности насыщения и коэрцитивной силы или коэрцитивной силы и удельного электрического сопротивления. Температурные интервалы развития хрупкости ферритно-аустенитной стали могут быть зафиксированы по измерениям коэрцитивной силы.

Таким образом, на примере сталей разных классов рассмотрены закономерности изменения магнитных, электрических и механических свойств при вариации температуры отпуска. Поскольку для сталей 2–5-й групп имеются значительные ограничения при определении структурного состояния и прочностных характеристик магнитными методами, то для решения этих задач необходимо изучение магнитных явлений в ферромагнетиках, параметры которых позволили бы однозначно характеризовать структурное состояние и прочностные характеристики контролируемых изделий. Можно отметить несколько подходов в решении данной проблемы:

- измерение магнитных свойств выше температуры Кюри карбидов;

- использование магнитоупругих параметров для целей контроля: а) изменений индукции при воздействии растягивающих и сжимающих напряжений, ударной нагрузки, динамических напряжений; б) двойного ЭМА-преобразования; в) маг-

нитоупругой акустической эмиссии;

- измерение магнитных характеристик в слабых полях (область Релея);

- применение методов многочастотного перемагничивания, а также регистрации высших гармонических составляющих.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Магнитные характеристики петли гистерезиса и кривой намагничивания не всегда можно применять для оценки структурного состояния и прочностных характеристик стальных термически обработанных изделий в силу отсутствия однозначной взаимосвязи между ними. Для разработки неразрушающих методов контроля используются новые физические явления, которые позволяют получить однозначную зависимость магнитных параметров от прочностных характеристик термически обработанных сталей.

13.1. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МАГНИТНЫХ СОСТОЯНИЙ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Новый подход в решении задач структуроскопии и оценки эксплуатационных свойств изделий дает изучение явлений устойчивости магнитных состояний ферромагнетиков к различным внешним воздействиям (магнитного и электромагнитного полей, механических напряжений и температуры) с учетом обратимых и необратимых процессов перемагничивания, протекающих в результате данных воздействий. Для контроля структурно-фазового состава сталей важно решение обратной задачи, когда на основе анализа устойчивости магнитных состояний ферромагнетика к внешним воздействиям можно определить эксплуатационные характеристики изделий.

Намагниченность ферромагнетика является функцией напряженности магнитного поля H , напряжений σ и температуры T . Изменения этих параметров меняют магнитное состояние ферромагнетиков и приводят к магнитному, магнитоупругому и термомагнитному гистерезису.

Устойчивость магнитных состояний к воздействию H , σ и T определяется магнитными константами ферромагнетика, характером процесса перемагничивания и степенью взаимодействия доменных границ с разного рода дефектами, существующими в большом количестве в реальных ферромагнетиках.

В сталях основной причиной, определяющей устойчивость магнитных состояний к действию магнитных и электромагнитных полей, является задержка смещения доменных границ вследствие их взаимодействия с различными магнитными несовершенствами материала. Критические поля и коэрцитивная сила, являющаяся усредненной характеристикой распределения критических полей в ферромагнетике, будут зависеть от структурного состояния и фазового состава ферромагнетиков.

Коэрцитивная сила отражает интегральные свойства ферромагнетика и характеризует его общую устойчивость к внешним воздействиям. Более точные сведения о характере протекания процессов намагничивания и перемагничивания, о взаимодействии доменных границ с определенными типами дефектов можно получить при исследовании устойчивости конкретного магнитного состояния или ряда магнитных состояний к воздействиям магнитных, электромагнитных полей, упругих и пластических деформаций и температур.

Остаточно-намагниченное состояние ферромагнетика является метастабильным. Анализ изменения устойчивости остаточной намагниченности при вариации различных внешних воздействий позволяет получить информацию о перераспреде-

лении намагниченности в ферромагнетике, т.е. о переходе доменных границ в новое состояние. Устойчивость состояния остаточной намагниченности в ферромагнетике зависит от структурных параметров и фазового состава ферромагнетика, от степени однородности распределения намагниченности в нем и от того, каким образом было получено состояние остаточной намагниченности, поэтому на основе анализа устойчивости магнитных состояний можно получить дополнительную информацию о структурном состоянии и фазовом составе ферромагнетика.

13.1.1. Структуроскопия сталей на основе анализа устойчивости их магнитных состояний к действию постоянных и переменных магнитных полей

Воздействие на ферромагнетик, находящийся в остаточно-намагниченном состоянии, небольшого по величине постоянного размагничивающего поля H_{p1}^- приводит к смещению доменных границ, для которых $H_{p1}^- > H_{k1}$, и они закрепляются в новом положении. Если уменьшить значение поля H_{p1}^- до нуля, то вновь приобретенное состояние остаточной индукции B_{d1} будет меньше B_r на величину ΔB_{d1}^- . Она характеризует объем ферромагнетика ΔV_1 , в котором остаточная индукция потеряла устойчивость под действием размагничивающего поля H_{p1}^- . Дальнейшее увеличение размагничивающего поля до значения H_{p2}^- приводит к новому перераспределению доменных границ в ферромагнетике, и остаточная индукция уменьшается на величину $\Delta B_{d2}^- = B_{d1}^- - B_{d2}^-$. Она характеризует объем ферромагнетика ΔV_2 с критическими полями $H_{k1} - H_{k2}$, потерявший устойчи-

вость остаточной индукции под действием поля $H_{p1}^- \leq H_p^- \leq H_{p2}^-$. Суммарное значение ΔB_{d1}^- и ΔB_{d2}^- позволяет оценить перемагничиваемый объем с критическими полями $0 - H_k$, причем $H_{k2} \leq H_{p2}^-$.

На рис. 13.1 показано изменение остаточной индукции B_d^- в зависимости от величины размагничивающего поля H_{pi}^- для образцов, отпущенных при разных температурах и имеющих различное исходное значение остаточной индукции (рис. 13.1, б, кривая I).

На рис. 13.1, а можно выделить три области устойчивости B_r^- к воздействию постоянного магнитного поля: I – область небольших размагничивающих полей, в которой значения B_d^- слабо изменяются при увеличении поля H_{pi}^- ; II – область наиболее интенсивной потери устойчивости остаточной индукции; III – область, в которой ферромагнетик уже практически перемагничен и приобрел состояние остаточной индукции, близкой к B_r . Диапазоны полей, для которых характерны области I–III, также определяются структурным состоянием образцов. Для магнитомягких образцов, отпущенных при высоких температурах (см. рис. 13.1 а, кривая I0), четко выражена область I, которой соответствуют незначительные изменения B_d^- при увеличении поля H_{pi}^- . Для области II этих образцов характерен интенсивный процесс потери устойчивости остаточной индукции в очень узком интервале размагничивающих полей.

Высокая устойчивость остаточной индукции в области I для низкоотпущенных образцов (20 ... 250 °С) связана с наличием значительных критических полей дефектов мартенситной структуры и вклю-

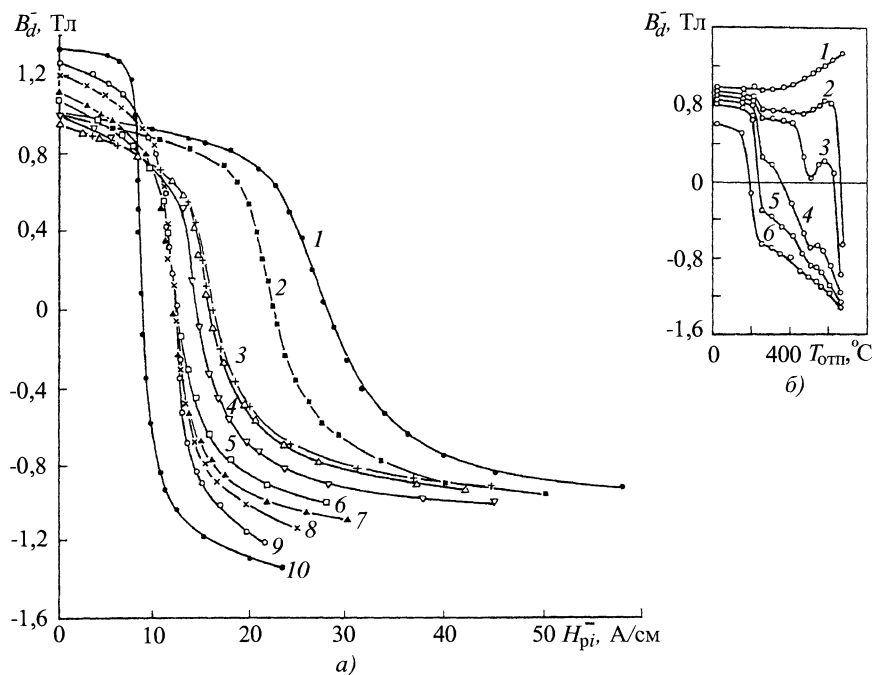


Рис. 13.1 Зависимости остаточной индукции B_d^- тороидальных образцов

из стали 34XN3M от напряженности размагничивающего поля H_{pi0}^- (а) и от температуры

отпуска при частичном размагничивании полем $H_{pi0}^- = \text{const}$ (б):

а – $T_{отп} = 20$ (1), 200 (2), 250 (3), 300 (4), 400 (5), 450 (6), 500 (7), 560 (8), 600 (9), 650 °C (10);

б – $H_{pi0}^- = 0$ (1), 10 (2), 12 (3), 15 (4), 18 (5), 23 A/cm (6)

чений остаточного аустенита, поэтому воздействие небольших размагничивающих полей нарушает состояние остаточной намагниченности наиболее "мягких" магнитных компонент с небольшим объемом. Относительно низкой устойчивостью остаточной индукции к действию постоянного поля обладают структуры стали, характерные для средних температур отпуска. При этих температурах отпуска сталь имеет достаточно совершенную матрицу, а выделившиеся карбидные частицы мелкодисперсны и имеют относительно низкие критические поля.

В высокоотпущенных образцах ($T_{отп} = 500 \dots 600$ °C), несмотря на то, что в целом матрица становится более совершенной, устойчивость остаточной индукции к воздействию слабых постоянных

полей сохраняется высокой. Это наблюдается у стали 34XN3M (см. рис. 13.1, б, кривые 2, 3), но особенно хорошо прослеживается для сталей с большим содержанием углерода – 60C2A и У8А. Такое поведение остаточной индукции связано с увеличением размеров карбидных частиц и достижением ими при коагуляции критического размера, при котором закрепление доменных границ максимально. Кроме того, закреплению доменных границ способствует и то, что вокруг ряда крупных включений может существовать напряженная зона, во много раз превышающая объем включения.

Появление значительных внутренних напряжений в околокарбидной зоне приводит к формированию лабиринтной (мозаичной) доменной структуры, которая

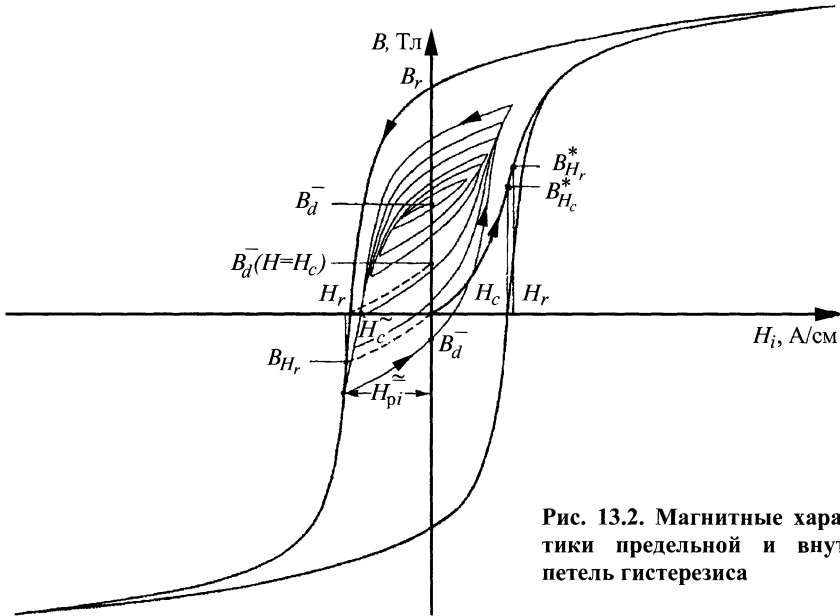


Рис. 13.2. Магнитные характеристики предельной и внутренних петель гистерезиса

должна обладать высокой устойчивостью к действию постоянных и переменных магнитных полей. Из рис. 13.1, б следует, что наименее устойчива к воздействию магнитных полей остаточная индукция высокоотпущенных образцов ($T_{\text{отп}} > 600^\circ\text{C}$), структура которых представляет собой магнитомягкую матрицу с относительно крупными включениями $d \gg \delta$. Так, воздействие постоянного магнитного поля $H_{pi}^- = 10 \text{ A/cm}$ (см. рис. 13.1, а, кривая 10) приводит к уменьшению остаточной индукции образцов с $T_{\text{отп}} = 650^\circ\text{C}$ стали 34ХНЗМ на 75 %. Это явление можно использовать при контроле высокоотпущенных деталей или при выявлении деталей, попавших на контроль в состоянии поставки.

Вновь приобретенное состояние остаточной индукции после воздействия определенных по значению постоянных размагничивающих полей характеризуется величиной B_d^- , которую можно использовать для определения прочностных харак-

теристик закаленных и отпущенных стальных изделий (см. рис. 13.1, кривые 4–6).

На петле по остаточной индукции можно выделить ряд точек, характеризующих необратимые процессы перемагничивания.

Одной из них является релаксационная коэрцитивная сила H_r (рис. 13.2) – напряженность магнитного поля, необходимого для приведения ферромагнетика с остаточной намагниченностью в статически размагниченное состояние. На рис. 13.1, а значения поля H_{pi}^- при $B_d^- = 0$

соответствуют релаксационным коэрцитивным силам тороидальных образцов. Релаксационная коэрцитивная сила вещества изменяется эквидистантно H_c , превышая ее на 2 ... 8 %. Исследования, выполненные на частных циклах, показали, что с уменьшением B_{max} разность между значениями H_c и H_r возрастает.

Важной характеристикой, позволяющей понять природу устойчивости магнитных состояний к внешним воздействи-

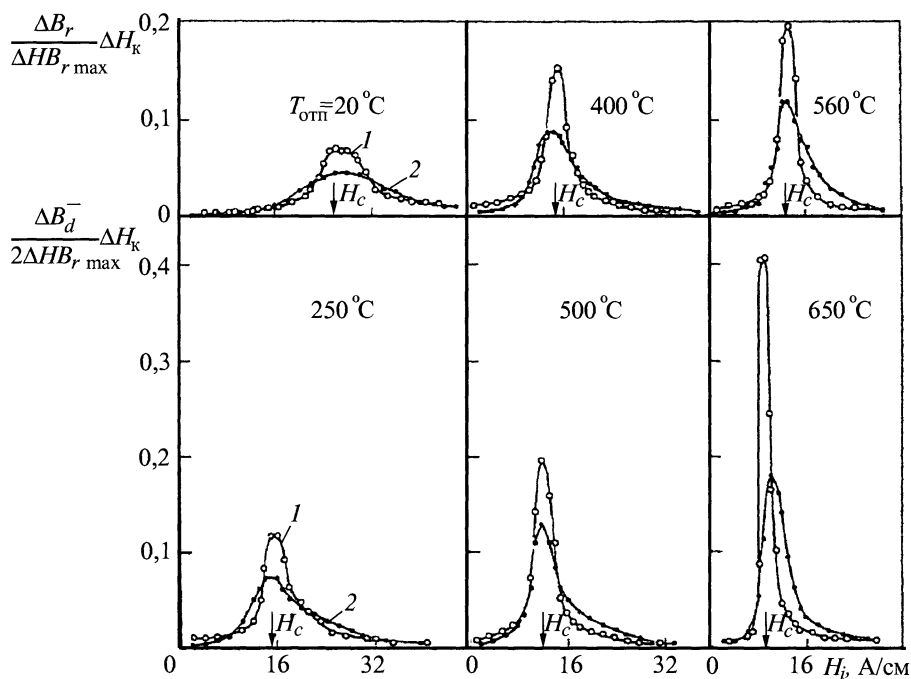


Рис. 13.3. Первичные (1) и вторичные (2) спектры жесткости тороидальных образцов стали 34XНЗМ для разных температур отпуска

ям и выяснить характер протекания необратимых процессов при намагничивании и перемагничивании сталей, является распределение критических полей.

Распределение критических полей в объеме ферромагнетика при его намагничивании и перемагничивании без учета ориентации доменных границ относительно направления приложенного поля оценено путем измерения и дифференцирования по H кривых остаточных индукций при наложении и снятии прямого $B_r(H)$ и обратного $B_d^-(H)$ магнитных полей. Полученные дифференцированием кривые называют спектрами жесткости, которые характеризуют необратимые изменения, происходящие в ферромагнетике при намагничивании (первичный спектр) и перемагничивании (вторичный спектр).

Площади первичных и вторичных спектров жесткости равны, так как после проведенного нормирования они пред-

ставляют собой соответственно намагниченные и перемагниченные объемы образца. Первичный спектр жесткости характеризует необратимые изменения намагниченности в относительном объеме $[\Delta B_r / (\Delta H B_{rmax})] \Delta H_k$. Вторичный спектр аналогичен первичному, но отражает необратимые изменения намагниченности при перемагничивании образца в объеме $[\Delta B_d^- / (2\Delta H B_{rmax})] \Delta H_k$. При совпадении спектров считается, что необратимые процессы протекают одинаково. В сталях 34XНЗМ (рис. 13.3), 60С2А и У8А процесс перемагничивания во всем диапазоне полей, за исключением участка слабых полей, идет несколько легче, чем процесс намагничивания. Различие в спектрах растет по мере повышения температуры отпуска.

При изменении структурного состояния образцов вид спектров меняется. Для мартенситных структур спектры пологие и охватывают широкую область полей. Из-

менения структуры, происходящие при повышении температуры отпуска до 350 °С (снижение внутренних напряжений и уменьшение степени тетрагональности решетки α -Fe), сопровождаются уменьшением среднего значения критических полей первичных и вторичных спектров.

При дальнейшем росте температуры отпуска среднее значение критических полей спектров должно уменьшаться, но интенсивный процесс коагуляции карбидов затрудняет процессы намагничивания и перемагничивания сталей, содержащих при $T_{отп} = 500 \dots 600$ °С включения критического размера. Это приводит к росту среднего значения критических полей и первичных, и вторичных спектров. Например, сравнение вторичных спектров образцов стали 34ХНЗМ с $T_{отп} = 500$ и 560 °С позволяет увидеть (см. рис. 13.3), что спектр, соответствующий $T_{отп} = 560$ °С, несколько шире и смещен в сторону больших полей. В полях $H_{pi} \geq 15$ А/см нисходящая ветвь спектра образца с $T_{отп} = 560$ °С идет ниже аналогичной ветви образца, отпущенного при 500 °С, т.е. наблюдается однозначная связь остаточной индукции B_d^- с $T_{отп}$ и появляется возможность контроля качества отпуска изделий с малым коэффициентом размагничивания.

О структурном состоянии сталей можно судить по виду самих спектров и их расположению в определенной области полей. В случаях, когда вторичные спектры похожи (например, при высокотемпературном отпуске), для анализа структурного состояния отпущенной стали можно привлечь первичные спектры, тогда идентификация структур отпущенной стали по параметрам обоих спектров получится более достоверной.

Сопоставить вклады обратимых процессов при намагничивании и перемагничивании можно при рассмотрении закономерностей изменения в зависимости от напряженности магнитного поля обратимых магнитных проницаемостей (рис. 13.4), изме-

ренных в отдельных точках кривой намагничивания $\mu_{обр}$ (кривая 1), нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса $\mu'_{обр}$ (кривая 2), а также в состояниях остаточной намагниченности после действия разных по значению намагничивающих $\mu_{обр}^r$ (кривая 3) и размагничивающих $\mu_{обр}^d$ (кривая 4) полей.

В слабых магнитных полях обратимые проницаемости $\mu_{обр}$ и $\mu'_{обр}$ уменьшаются и практически не зависят от поля. При преобладании процессов смещения доменных границ независимость значений обратимой магнитной проницаемости от напряженного магнитного поля связана с тем, что площадь стенок Блоха остается постоянной. Поскольку подвижность доменных стенок с увеличением поля меняется, то более вероятно, что постоянство значения обратимой проницаемости вызвано действием двух взаимно уравновешивающих факторов – уменьшением площади и увеличением подвижности смещающихся доменных границ. В свою очередь, рост обратимой проницаемости $\mu'_{обр}$, наблюдаемый при изменении напряженности поля в интервале $0-H_c$ (см. рис. 13.4, кривые 2), по-видимому, связан с увеличением площади и подвижности смещающихся доменных границ.

В полях $H_i > H_c$ происходит аннигиляция части доменных границ, что вызывает снижение значений обратимых проницаемостей. При этом кривые $\mu_{обр}(H)$ и $\mu'_{обр}(H)$ идут ниже кривых $\mu_{обр}^r(H)$ и $\mu_{обр}^d(H)$ (ср. кривые 1, 2 и 3, 4). Следовательно, можно предположить, что подвижность и площадь смещающихся доменных стенок в метастабильном остаточном состоянии выше, чем в приложенном поле. Совпадение $\mu_{обр}$ и $\mu'_{обр}$ (соответственно $\mu_{обр}^r$ и $\mu_{обр}^d$) свидетельствует об общности протекания обратимых процессов намагничивания и перемагничивания.

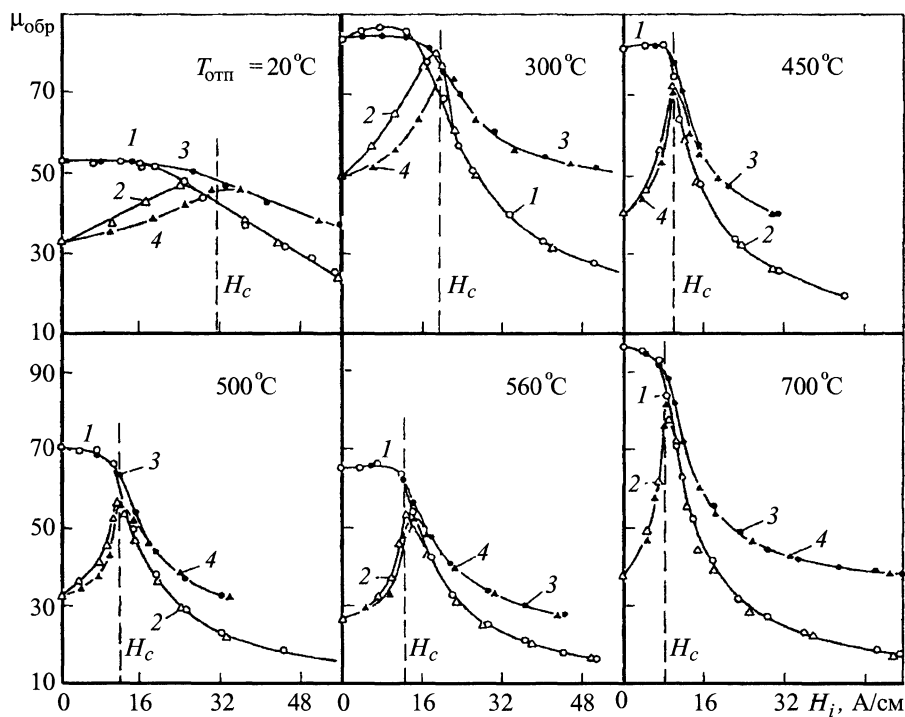


Рис. 13.4. Зависимости обратимых проницаемостей $\mu_{обр}$ (1), $\mu'_{обр}$ (2), $\mu^r_{обр}$ (3), $\mu^d_{обр}$ (4) стали 60С2А от напряженности магнитного поля

Анализ результатов измерений обратимых проницаемостей показывает, что отношение $\mu^r_{обр}$ в поле $H_i = 0$ (см. рис. 13.4) однозначно изменяется с температурой отпуска. Для сталей 34ХНЗМ, 60С2А и У8А диапазон температур возможного контроля отпуска составляет 150 ... 650, 400 ... 700 и 250 ... 700 °С соответственно (рис. 13.5).

Разделение процессов намагничивания и перемагничивания на обратимые и необратимые составляющие свидетельствует, что их вклад при одинаковых напряженностях поля и индукции в условиях намагничивания и перемагничивания различен. Это различие определяет разный характер зависимости от температуры отпуска значений индукции, соответствующих полю релаксационной коэрцитивной

силы на кривой намагничивания $B_{H_r}^*$ ($T_{отп}$) и на нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса B_{H_r} ($T_{отп}$) (см. рис. 13.2), что позволяет использовать эти параметры для контроля качества отпуска изделий в разных температурных интервалах.

При разрушении остаточно-намагниченного состояния ферромагнетика переменным магнитным полем приобретаемое состояние остаточной индукции B_d^- отличается от состояния B_d^- , обусловленного действием постоянного размагничивающего поля (см. рис. 13.2).

Закономерности изменения остаточной индукции B_d^- , измеренной после частичного размагничивания образцов из состояния остаточной индукции под дейст-

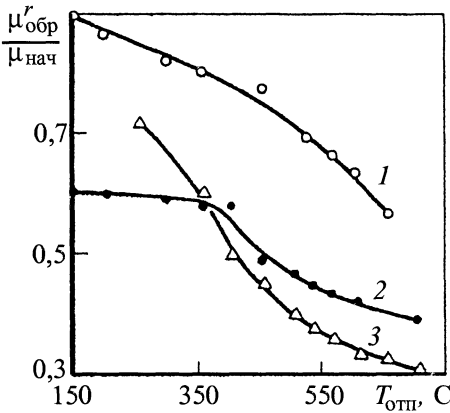


Рис. 13.5. Зависимость отношения $\mu_{обр}^r / \mu_{нач}$ от температуры отпуска сталей 34ХНЗМ (1), 60С2А (2) и У8А (3)

вием переменного поля, от его амплитуды (H_{pi}^{\sim}) для закаленных и отпущенных торoidalных образцов из стали 60С2А иллюстрирует рис. 13.6. На кривых $B_d^{\sim}(H_{pi}^{\sim})$, как и на кривых $B_d^{\sim}(H_{pi}^{\sim})$ (см. рис. 13.1), можно выделить три области с разной устойчивостью остаточной индукции к воздействию переменного поля.

Существование скин-эффекта приводит к неравномерному распределению поля по сечению образца. Глубина проникновения переменного магнитного поля в термически обработанные образцы и соответственно доля размагничиваемого объема под действием приложенного переменного поля зависят от электрической проводимости и магнитной проницаемости ферромагнетика. Влияние магнитной проницаемости будет определяющим, так как при изменении температуры отпуска в интервале 20 ... 700 °С удельное электрическое сопротивление сталей монотонно снижается примерно на 20 %, а магнитная проницаемость в полях до 30 А/см изменяется в 1,5 ... 6 раз.

Различия в устойчивости остаточной индукции к действию постоянного и переменного магнитных полей вызывают

изменения в характере поведения в зависимости от температуры отпуска остаточных индукций B_d^{\sim} и B_d^{\sim} , что можно использовать для контроля качества высокотемпературного отпуска изделий.

Результаты изучения влияния переменного магнитного поля на устойчивость остаточной индукции позволяют предположить, что ферромагнетики с разным структурным состоянием, имеющие одинаковое значение остаточной индукции и коэрцитивной силы, будут обладать различной коэрцитивностью H_c^{\sim} . Под коэрцитивностью будем понимать величину поля, измеряемую аналогично коэрцитивной силе из вторичного остаточно-намагниченного состояния B_d^{\sim} , полученного после воздействия на остаточно-намагниченный ферромагнетик плавно возрастающего и плавно убывающего магнитного поля H_{pi}^{\sim} (см. рис. 13.2).

На рис. 13.7 представлены закономерности изменения коэрцитивной силы H_c^{\sim} от величины размагничивающего поля. Переменное магнитное поле при амплитудах, меньших коэрцитивной силы ферромагнетика, практически не оказывает влияния на H_c^{\sim} . Значение H_c каждого образца соответствует значениям H_c^{\sim} при $H_{pi}^{\sim} = 0$; увеличение амплитуды поля $H_{pi}^{\sim} > H_c$ приводит к уменьшению H_c^{\sim} .

Для жестких в магнитном отношении образцов уменьшение H_c^{\sim} начинается в полях, практически соответствующих H_c предельного цикла магнитного гистерезиса. Для мягких образцов снижение наблюдается в полях, несколько больших H_c (см. рис. 13.7, кривые 6–11). Отсутствие влияния переменного магнитного поля с амплитудой $H_{pi}^{\sim} < H_c$ на величину H_c^{\sim} можно объяснить тем, что под его действием хоть и изменяется остаточная индук-

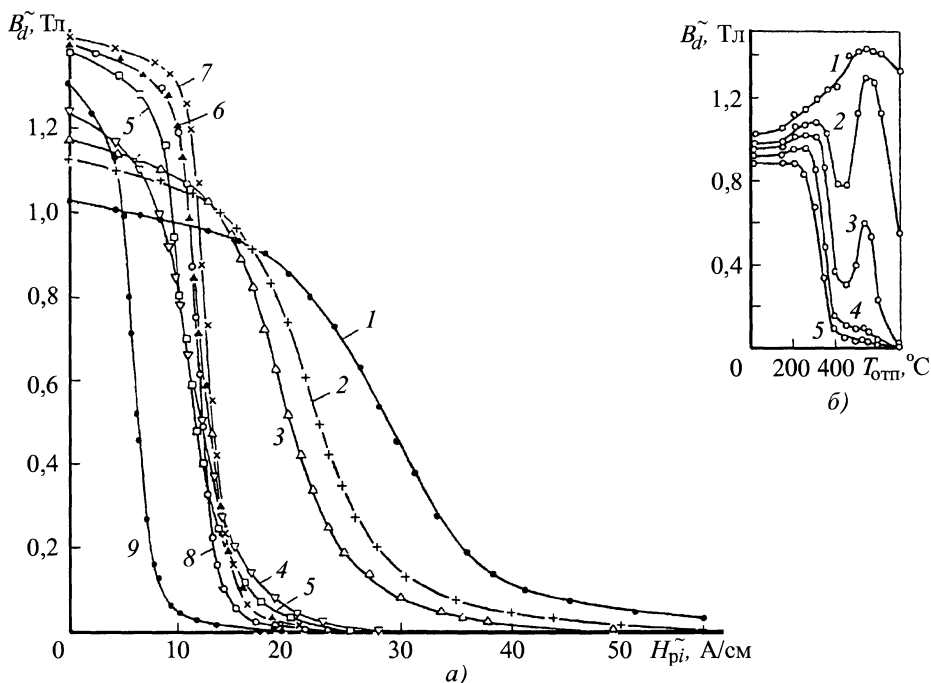


Рис. 13.6. Зависимости остаточной индукции B_d^{\sim} тороидальных образцов из стали 60С2А от напряженности размагничивающего поля H_{pi}^{\sim} (а) и от температуры отпуска при частичном размагничивании полем $H_{pi}^{\sim} = \text{const}$ (б):
 а – $T_{отп} = 20$ (1), 250 (2), 300 (3), 400 (4), 450 (5), 500 (6), 560 (7), 600 (8), 700 °С (9);
 б – $H_p^{\sim} = 0$ (1), 10 (2), 13 (3), 16 (4), 18 А/см (5)

ция (см. рис. 13.6), но смещение доменных границ происходит в участках ферромагнетика, для которых $H_{pi}^{\sim} < H_c$, т.е. доменные стенки, первоначально имеющие $H_k \leq H_c$, перейдут в более устойчивое состояние, что способствует их более сильному закреплению на дефектах. В полях $H_{pi}^{\sim} \geq H_c$ переменное магнитное поле становится достаточным для воздействия на доменные стенки, закрепленные на дефектах с критическими полями $H_k \leq H_{pi}^{\sim}$. Поскольку воздействие переменного магнитного поля $H_{pi}^{\sim} \leq H_c$ приводит к образованию более устойчивого

состояния остаточной намагниченности, то начальные участки кривой размагничивания петли гистерезиса имеют вид, характерный для магнито жестких ферромагнетиков.

Анализируя рис. 13.7, можно установить, что закономерности изменения H_c^{\sim} от $T_{отп}$ по мере повышения амплитуды переменного магнитного поля изменяются и при $H_{pi}^{\sim} > H_c$ для образцов с температурами отпуска 150 ... 700 °С характерна однозначная зависимость H_c^{\sim} от $T_{отп}$, т.е. коэрцитивную силу частично размагниченного состояния можно использовать для контроля качества отпущенных изделий (рис. 13.8).

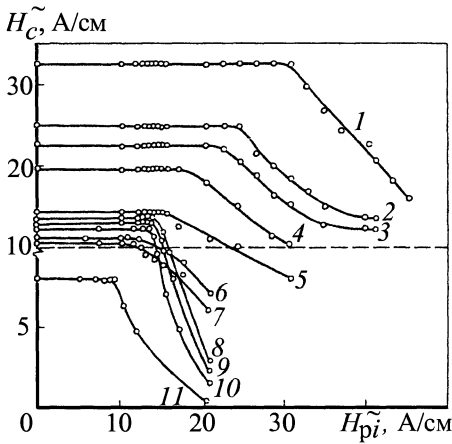


Рис. 13.7. Зависимости коэрцитивной силы от напряженности переменного магнитного поля для тороидальных образцов из стали 60С2А при разных значениях $T_{отп}$, °С: 1 – 150; 2 – 200; 3 – 250; 4 – 300; 5 – 350; 6 – 400; 7 – 450; 8 – 530; 9 – 560; 10 – 600; 11 – 700

Устойчивость магнитных состояний ферромагнетика зависит от способа получения исходного состояния (например, состояния остаточной намагниченности).

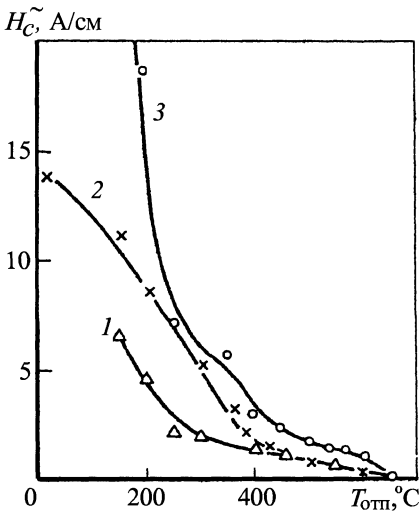


Рис. 13.8. Зависимости коэрцитивной силы от температуры отпуска сталей 34ХНЗМ (1), 60С2А (2) и У8А (3) при действии переменного магнитного поля $H_{ре}^- = 61,5$ А/см

Исследования вариаций влияния исходного состояния остаточной намагниченности и последующих воздействий переменного и постоянного магнитных полей показали, что при контроле качества термической обработки изделий методом измерения остаточной индукции B_d^- стабильность показаний средств контроля зависит от способа получения исходного состояния остаточной намагниченности. Если исходная остаточная намагниченность не соответствует максимальному значению, а получена под действием дополнительных постоянных размагничивающих полей, то вполне возможно, что при воздействии на изделие переменного магнитного поля она будет не убывать, а возрастать. Установлено, что метод последовательного наложения на остаточно-намагниченный ферромагнетик постоянного и переменного магнитных полей и регистрации вторичной остаточной индукции можно использовать в практике НК качества термической обработки изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 %.

При разработке методов контроля качества термической обработки приходится учитывать, что изделия имеют разные геометрические размеры. При наложении на остаточно намагниченный ферромагнетик постоянного размагничивающего поля перемагничивание в различных сечениях по его длине происходит по разным циклам, поэтому одни и те же дефекты структуры в разных участках ферромагнетика будут по-разному влиять на устойчивость состояния остаточной индукции. Неоднородное намагничивание приводит к тому, что закономерности изменения B_d^- от $T_{отп}$, соответствующие одним и тем же значениям размагничивающих полей $H_{ре}^-$ при

уменьшении величины коэффициента размагничивания изделий видоизменяются (рис. 13.9, а–з). Для образцов $10 \times 10 \times 62$ мм ($N \approx 0,038$) однозначная зависи-

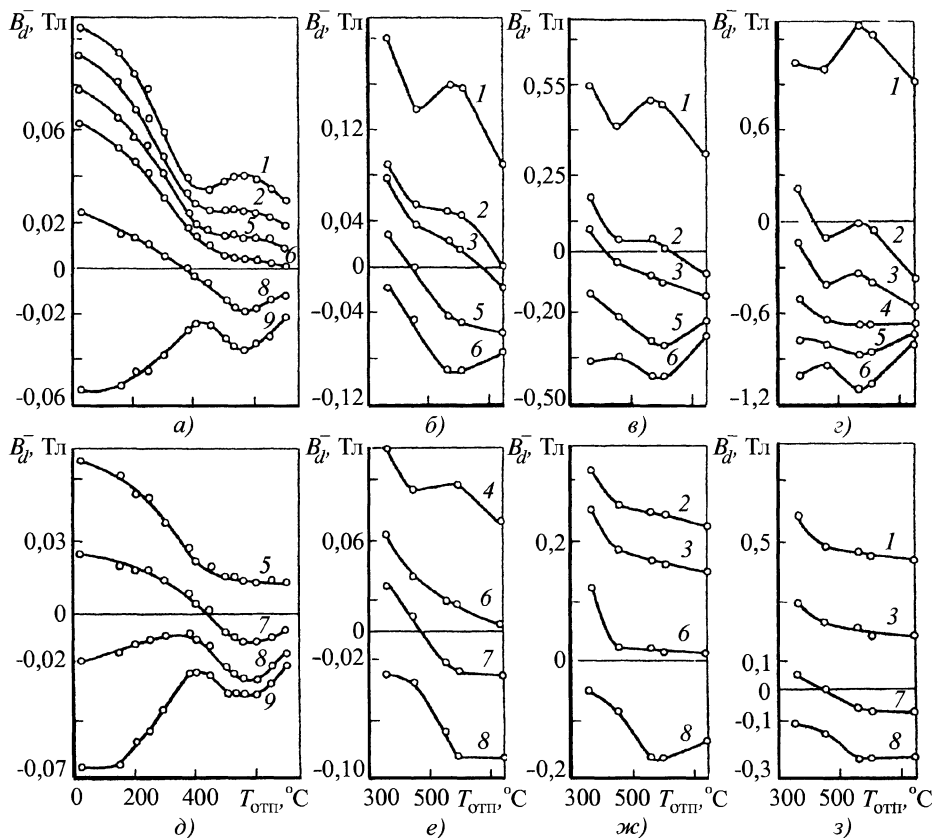


Рис. 13.9. Зависимость остаточной индукции B_d^- для прямоугольных

стержней $10 \times 10 \times 62$ мм (а, д), $4 \times 4 \times 62$ мм (б, е), $2 \times 2 \times 62$ мм (в, ж) и $1 \times 1 \times 62$ мм (з, з) из стали 60С2А от температуры отпуска при разных условиях частичного размагничивания:

$a-z - H_{pe}^- = 0$ (1), 15,4 (2), 20 (3), 25 (4), 30,8 (5), 46,2 (6), 57,7 (7), 92,4 (8), 230 А/см (9);

$\partial-z - B_p^- = 0,4$ (1), 0,2 (2), 0,1 (3), 0,05 (4), -0,05 (5), -0,1 (6), -0,2 (7), -0,4 (8), -0,8 Тл (9)

мость наблюдается при $H_{pe}^- = 30 \dots 46$ А/см, для образцов $4 \times 4 \times 62$ мм ($N \approx 0,009$) – при 20 А/см, а для образцов $1 \times 1 \times 62$ мм ($N \approx 0,0009$) однозначная зависимость $B_d^-(T_{otp})$ не получена.

При размагничивании образцов до одинаковых значений индукции B_p^- (см. рис. 13.9, $\partial-z$) величина остаточной индукции B_d^- также монотонно меняется с

температурой отпуска, причем закономерности изменения B_d^- от T_{otp} для образцов с разным коэффициентом размагничивания для случаев $H_{pe}^- = const$ и $B_p^- = const$ различаются, что можно использовать при решении соответствующих задач контроля.

Сопоставление кривых, характеризующих зависимости H_c и H_r от T_{otp} для стали 60С2А, свидетельствует о том, что

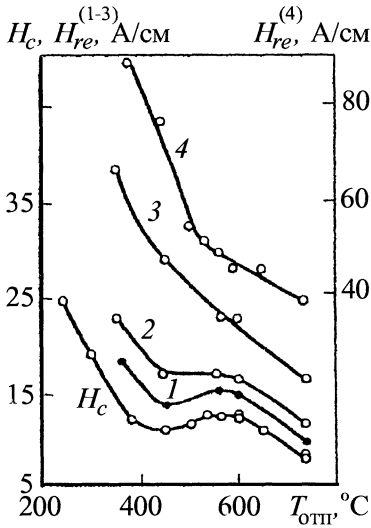


Рис. 13.10. Зависимости коэрцитивной и релаксационной коэрцитивной сил для прямоугольных стержней $1 \times 1 \times 62$ (1), $2 \times 2 \times 62$ (2), $4 \times 4 \times 62$ (3) и $10 \times 10 \times 62$ мм (4) из стали 60С2А от температуры отпуска (намагничивание до $B_{\max} = 1,6$ Тл)

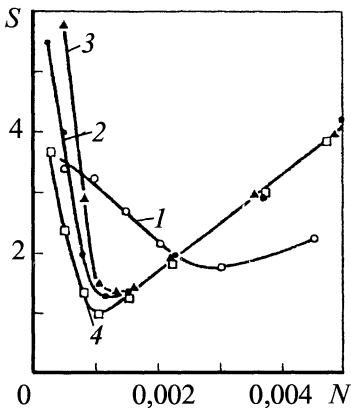


Рис. 13.11. Зависимость обратной величины чувствительности остаточной намагниченности к действию постоянного внешнего магнитного поля от коэффициента размагничивания при разных значениях $T_{\text{отп}}$, °C: 1 – 250; 2 – 450; 3 – 600; 4 – 700

на коэрцитивную силу практически не влияет значение коэффициента размагничивания, а релаксационная коэрцитивная сила H_{re} с увеличением его значений возрастает (рис. 13.10), при этом изменяется характер зависимости $H_{re}(T_{\text{отп}})$. Однозначный ход кривых $H_{re}(T_{\text{отп}})$, наблюдаемый для прямоугольных образцов с $N \approx 0,038$ и $0,009$, при уменьшении коэффициента размагничивания становится неоднозначным (см. кривые 1, 2), таким, какой характерен для тороидальных образцов.

Таким образом, устойчивость состояния остаточной индукции к действию внешних магнитных полей определяется как структурным состоянием (магнитной жесткостью) ферромагнетика, так и его коэффициентом размагничивания, что необходимо учитывать при разработке методики контроля качества промышленных изделий.

На графически записанных петлях магнитного гистерезиса $B_{\max} = 1,6$ Тл для тороидальных образцов стали из 60С2А были проведены линии сдвига, и для разных значений коэффициента размагничивания определена обратная величина чувствительности S остаточной индукции к действию внешних магнитных полей. Максимальное значение S для образцов, отпущенных при $450 \dots 700$ °C, к внешним магнитным полям (рис. 13.11, кривые 2–4) получена для $N \approx 0,001$. Это значение N соответствует геометрическим размерам исследованных стержней $1 \times 1 \times 62$ мм. Для образца с температурой отпуска 250 °C (кривая 1) максимальное значение S соответствует $N \approx 0,003$, т.е. размерам $2 \times 2 \times 62$ мм.

Рис. 13.12 и 13.13 иллюстрируют возможность оценки структурного состояния закаленных и отпущенных на различные температуры изделий из 12 наиболее распространенных в современном машиностроении марок сталей.

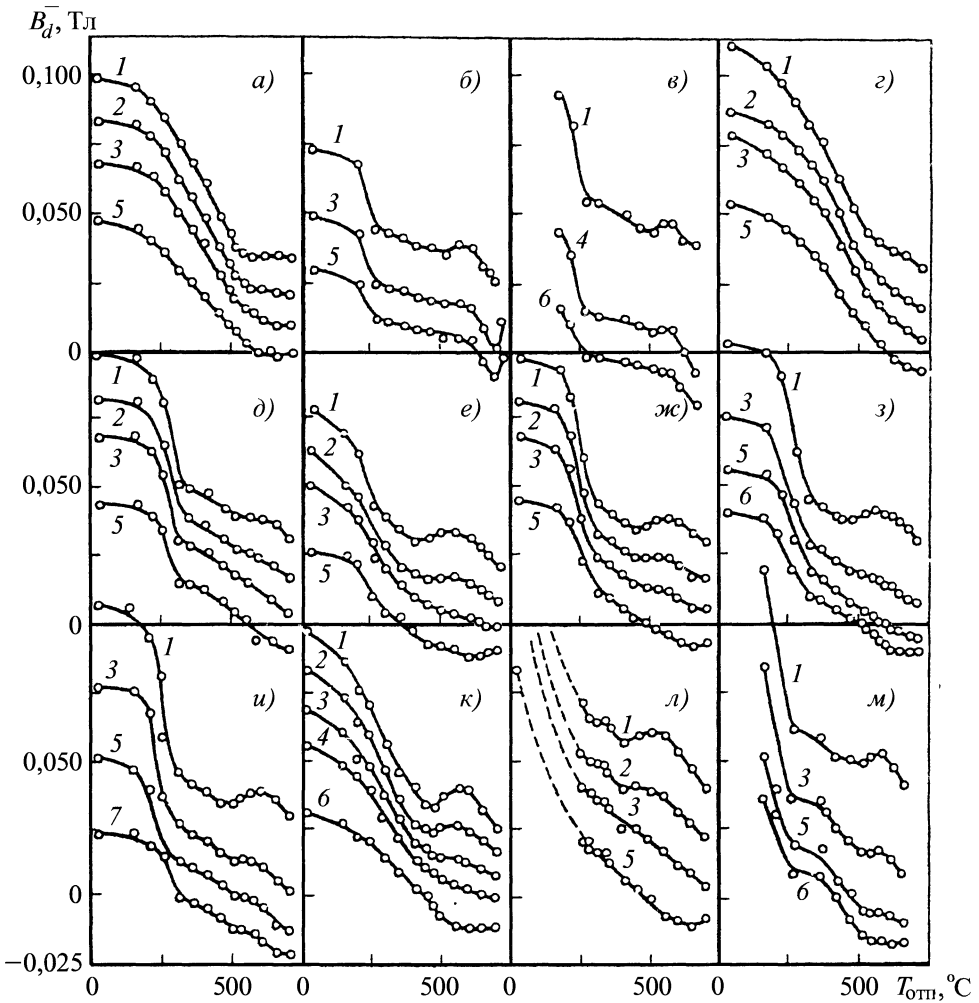


Рис. 13.12. Зависимость остаточной индукции после частичного размагничивания стальных образцов постоянным магнитным полем от температуры отпуска:

a – 30ХГСА; *б* – 30ХН2МФА; *в* – 34ХН3М; *г* – 35ХГСА; *д* – 40Х; *е* – 45; *ж* – 50; *з* – 50РА;
и – 50Л; *к* – 60С2А; *л* – 8ХФ; *м* – У9А; 1 – $H_{pe}^- = 0$; 2 – 15,4; 3 – 30,8; 4 – 46,2; 5 – 57,7;
 6 – 77,0; 7 – 92,4 А/см

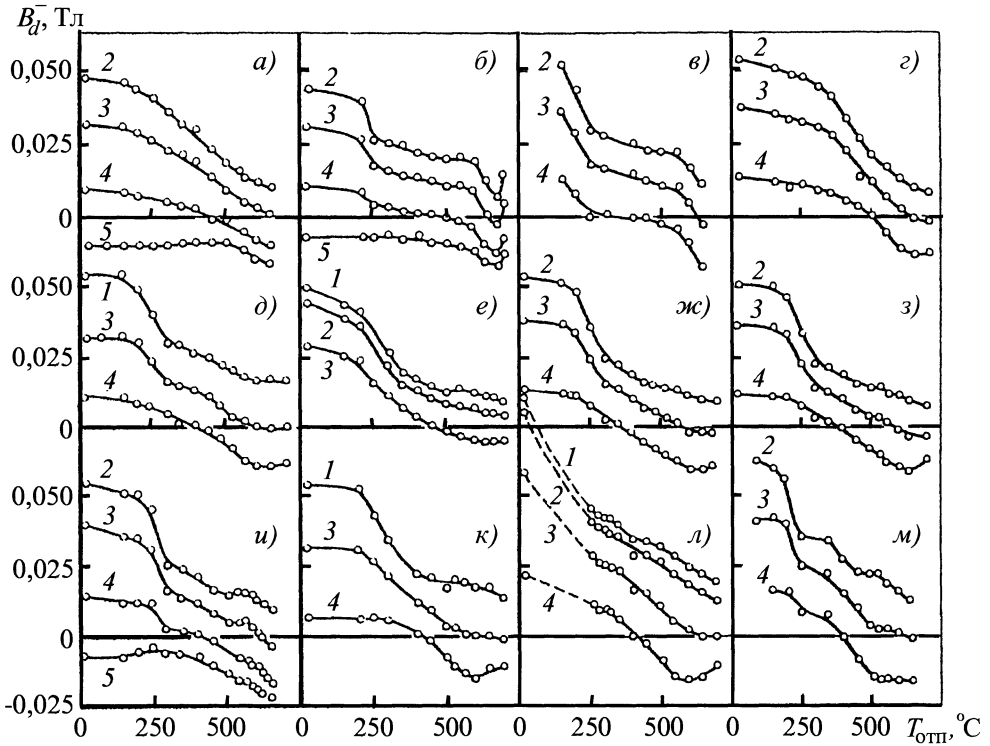


Рис. 13.13. Зависимость остаточной индукции после частичного размагничивания стальных образцов до одинаковых значений индукции от температуры отпуска:

a-m – то же, что и на рис. 13.12; 1 – $B_p = -0,02$; 2 – $-0,04$, 3 – $-0,1$; 4 – $-0,2$; 5 – $-0,3$ Тл

13.1.2. Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий с различной структурой к действию упругих напряжений

При воздействии упругих деформаций на ферромагнетик, находящийся в остаточно-намагниченном состоянии, происходит необратимое смещение доменных границ или вращение векторов спонтанной намагниченности, в результате чего ферромагнетик приобретает новое магнитное состояние. Изменение значения напряжений и возвращение его в исходное состояние сопровождаются магнитоупругим гистерезисом. Одни и те же структурные параметры оказывают разное влияние

на устойчивость состояния остаточной намагниченности ферромагнетика при действии магнитного поля и упругой деформации. Под действием магнитного поля происходит изменение остаточно-намагниченного состояния ферромагнетика за счет смещения доменных границ всех типов. В случае действия упругих деформаций смещение доменных границ вызывается магнитоупругим взаимодействием 90-градусных доменов с полем действующих напряжений, которое, в свою очередь, может вызвать движение 180-градусных доменных границ, т.е. будет происходить как бы кластерное перемагничивание. Предполагая различие в дейст-

вии магнитного поля и упругой деформации на ферромагнетик, можно ожидать различия в устойчивости магнитных состояний к этим воздействиям и таким образом получить дополнительную возможность для анализа структурного состояния ферромагнетиков.

Рис. 13.14, а иллюстрирует закономерности изменения остаточной намагниченности образцов из сталей 45 и 51ХФА под действием упругих напряжений. Поскольку состояние остаточной намагниченности является метастабильным, то действие упругих деформаций приводит преимущественно к необратимому смещению доменных границ. Внутреннее размагничивающее поле ферромагнетика $H_{i\ominus} \sim NM$ при перестройке доменной структуры стремится обеспечить состояние с минимумом свободной энергии, что приведет к уменьшению величины M_r (кривая 1). Под действием внешних напряжений формируется магнитная текстура, которая при их снятии в результате влияния внутренних полей микронапряжений и размагничивающего поля частично разрушается, что сопровождается уменьшением остаточной намагниченности (кривая 2).

Изучение закономерностей изменения остаточной намагниченности M_r в зависимости от внешних упругих напряжений растяжения (рис. 13.14, б) и сжатия показало, что значение ΔM_r линейно убывает по мере их роста. Только для магнитомягких образцов наблюдаются зависимости, близкие к экспоненциальной. Тангенс угла наклона линейного участка зависимости $\Delta M_r(\sigma_0)$, характеризующий магнитоупругую чувствительность $\Delta M_r / \Delta \sigma_0$ остаточной намагниченности, минимален для магнито жестких образцов и максимален для магнитомягких. В целом магнитоупругая чувствительность остаточной намагниченности для сжатия несколько меньше, чем для растяжения. Зависимости изменения остаточной намагниченности, а также коэффи-

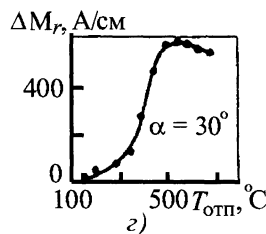
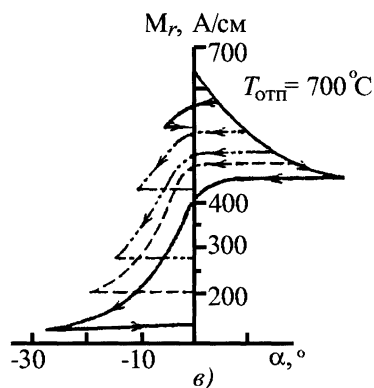
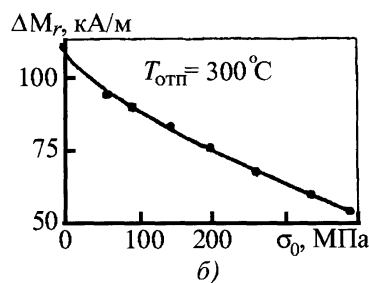
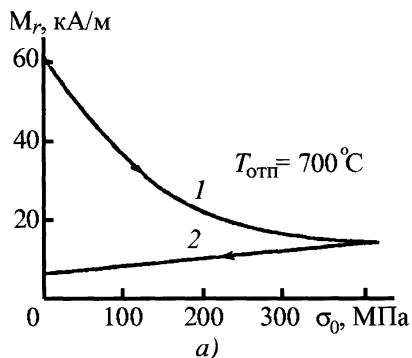


Рис. 13.14. Зависимости величин M_r и ΔM_r для образцов из сталей 45 и 51ХФА от напряжений (а, б), угла закручивания (в) и температур отпуска (з)

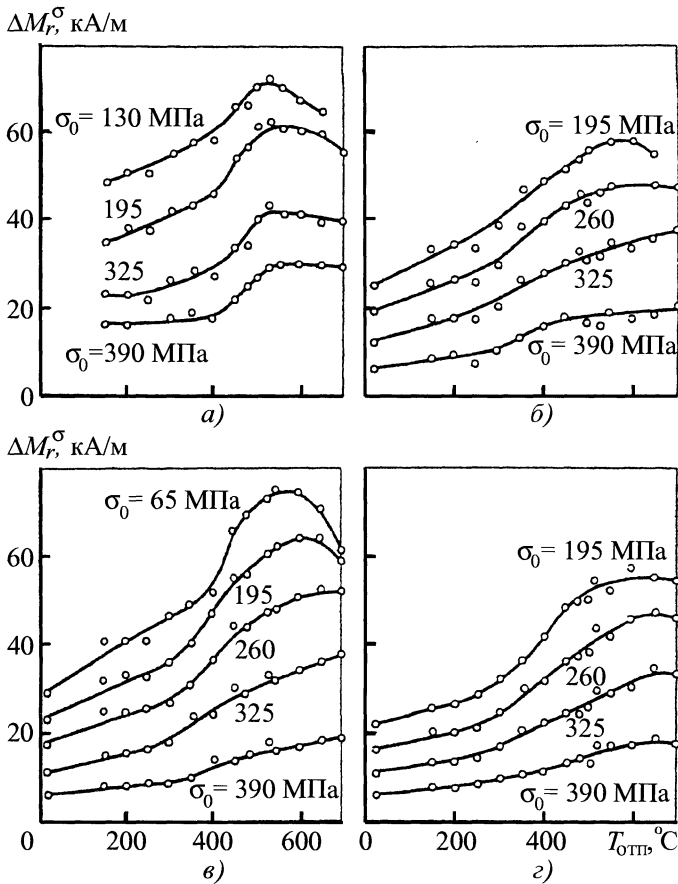


Рис. 13.15. Зависимость изменения остаточной намагниченности ΔM_r^σ установившегося цикла от температуры отпуска сталей 30ХГС (а), 45 (б), 60Г (в) и У8 (з) после действия упругих напряжений растяжения σ_0

тивной силы от приложенных напряжений свидетельствуют о возможности оценки значений действовавших ранее одноосных растягивающих или сжимающих напряжений в стальных изделиях по измеренным значениям остаточной намагниченности.

При упругом закручивании образцов в виде стержней (рис. 13.14, в) также наблюдается уменьшение остаточной намагниченности. В зависимости от степени магнитной жесткости образцов снижение M_r может быть линейным или экспонен-

циальным. В образцах, деформируемых кручением, возникают чисто сдвиговые деформации, поэтому характер создаваемой магнитной текстуры отличается от случаев растяжения или сжатия. Снятие крутящих нагрузок сопровождается изменением M_r только в области приближения к нулевым значениям угла закручивания α . Закручивание в другую сторону приводит к дальнейшему уменьшению значений M_r . При раскручивании величина M_r сохраняет свое значение, достигнутое при

закручивании. Наблюдаемое изменение M_r при закручивании можно использовать для оценки структурного состояния термически обработанных изделий (рис. 13.14, з) и как элемент "памяти" по отношению к действовавшим на ферромагнетик крутящим моментам, т.е. для создания преобразователей запоминания крутящего момента или угла закручивания.

Относительное изменение остаточной намагниченности при действии внешних напряжений растяжения, сжатия и кручения является структурно-чувствительной величиной, и ее можно использовать в практике структурного анализа сталей. На примере сталей 30ХГС, 45, 60Г и У8 (рис. 13.15) видно, что при воздействии определенных значений внешних напряжений растяжения по значению ΔM_r можно оценить структурное состояние изделий, отпущенных в широком диапазоне температур. Однако для высоких температур отпуска зависимость ΔM_r от $T_{отп}$ может быть неоднозначной или чувствительность ΔM_r может быть недостаточно высокой для осуществления контроля.

Исследование устойчивости остаточной намагниченности к действию знакопеременных циклических напряжений небольшой амплитуды (20 ... 25 МПа) показало, что остаточная намагниченность M_r , пропорциональная магнитному полю рассеяния от образцов H_d (рис. 13.16), монотонно изменяется с температурой отпуска и может быть использована для контроля качества отпуска изделий.

В других методах контроля качества закалки и последующего средне- и высокотемпературного отпуска регистрация изменения параметров магнитного состояния под действием растягивающих или сжимающих напряжений, а также при ударе осуществляется в поляризуемом магнитном поле определенной величины. Из анализа характера зависимостей приращений магнитной индукции ΔB , обусловленной изменением магнитных

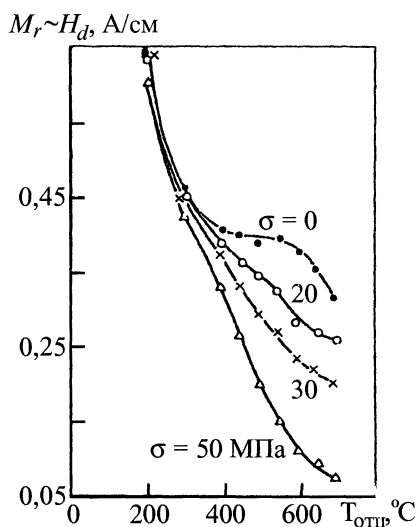


Рис. 13.16. Зависимость остаточной намагниченности стали 38ХС от температуры отпуска после действия знакопеременных циклических напряжений

свойств стальных изделий в результате действия упругих нагрузок сжатия или растяжения, от температуры отпуска следует, что наиболее приемлемым для контроля является интервал 150 ... 500 °С. Отпуск изделий при более высоких температурах проконтролировать трудно, поскольку для ряда сталей при 560 ... 600 °С величина ΔB достигает максимального значения, а затем уменьшается или остается постоянной. Следовательно, как и в первом случае, для некоторых сталей с содержанием углерода более 0,3 % данный способ неразрушающего контроля качества отпущенных изделий может оказаться эффективным только для интервала температур 150 ... 500 °С.

Исследования, выполненные на ряде конструкционных сталей, дают основания рекомендовать для целей контроля качества средне- или высокотемпературного отпуска *магнитоупругоакустический метод*. В качестве параметра контроля используются значение U в измерительной катушке или значение усредненной по се-

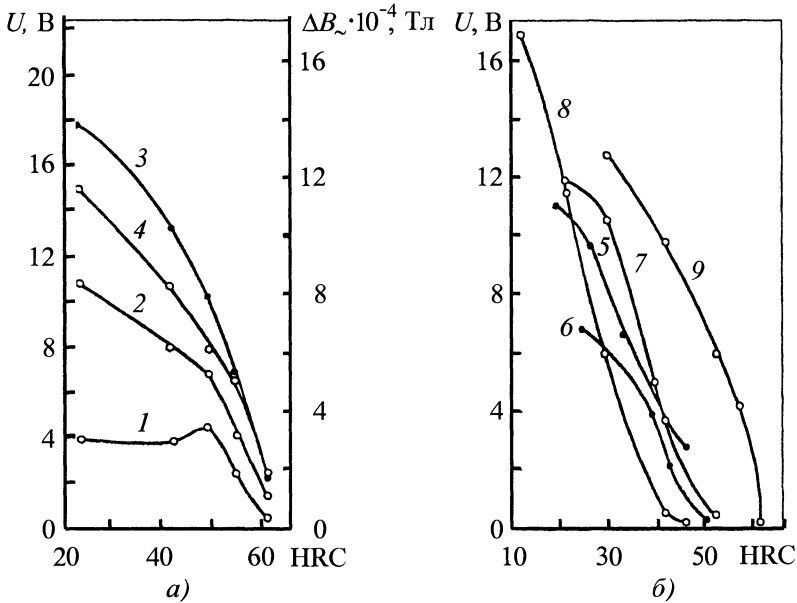


Рис. 13.17. Зависимости параметров U и ΔB_{\sim} от твердости образцов при $H = 20$ (1, 7), 25 (6), 37 (2), 180 (3, 5, 8, 9) и 400 А/см (4) для сталей У8А (1–4), 30ХГСА (5), 40Х (6), 45ХНМФ (8) и ХВГ (9)

чению переменной магнитоупругой индукции ΔB_{\sim} при возбуждении в намагниченном ферромагнетике ультразвуковых колебаний частотой 16 ... 21 кГц с амплитудным напряжением $\sigma = (0,5 \dots 1,5)10^7$ Н/м².

На рис. 13.17, а приведены закономерности изменения величин U и ΔB_{\sim} от твердости образцов из стали У8 при разных значениях напряженности H постоянного магнитного поля. При небольших значениях H зависимости U и ΔB_{\sim} от HRC неоднозначны, но по мере увеличения напряженности магнитного поля они становятся однозначными. Однако чувствительность параметров U и ΔB_{\sim} к изменению твердости отпущенных образцов для различных намагничивающих полей неодинакова. На рис. 13.17, б показаны закономерности изменения параметра U от твердости для разных конструкционных сталей.

Изменения остаточной намагниченности под действием напряжений растя-

жения, сжатия, кручения и знакопеременных динамических напряжений являются структурно-чувствительными параметрами и могут однозначно характеризовать качество термической обработки. Исследования в этом направлении дают возможность не только оценивать структурное состояние стали и определять уровень приложенных напряжений, но и запоминать максимальные действовавшие напряжения (создавать датчики запоминания), а также осуществлять контроль изменений напряженного состояния в процессе эксплуатации.

13.1.3. Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий к воздействию температуры

При температуре аустенизации конструкционные стали находятся в парамагнитном состоянии. Если изделие при закалке охладить в магнитном поле, то оно приобретает термоостаточную намагни-

ченность (индукцию) $M_r^t (B_r^t)$. Необратимые процессы намагничивания, происходящие в ферромагнетике при обычном намагничивании в сильных магнитных полях, могут протекать в данном случае в слабых магнитных полях вследствие снижения константы магнитной анизотропии, поэтому в области температуры Кюри возможно намагничивание изделия в слабых полях до больших значений остаточной намагниченности.

Исследования зависимостей магнитных свойств, полученных в процессе закалки от различных температур, выполненные на образцах из сталей 25X2Н4ВА, 40X и 30ХРА, показали, что термоостаточная индукция (намагниченность) по мере роста температуры аустенизации растет и примерно при $T_{\text{зак}} = 800^\circ\text{C}$ достигает максимального значения (рис. 13.18), т.е. B_r^t чувствительна к недогреву изделий при закалке, поэтому ее можно использовать для определения этого вида брака закаленных изделий. Данный метод контроля недогрева изделий при закалке можно легко реализовать в производственных условиях, без больших затрат по созданию аппаратуры контроля и мощных намагничивающих устройств.

Исследование влияния температуры на устойчивость остаточной индукции конструкционных сталей в чистом виде провести затруднительно, поскольку при нагреве ферромагнетика наряду с обратимыми изменениями могут происходить необратимые изменения магнитных свойств, вызванные структурными изменениями и фазовыми превращениями.

Результаты исследований кинетики устойчивости состояния термоостаточной намагниченности закаленных образцов к воздействию различных температур отпуска представлены на рис. 13.19. Для каждой термокинетической кривой термоостаточной намагниченности M_r^t характерны три участка: нагрев, изотермическая выдержка и охлаждение.

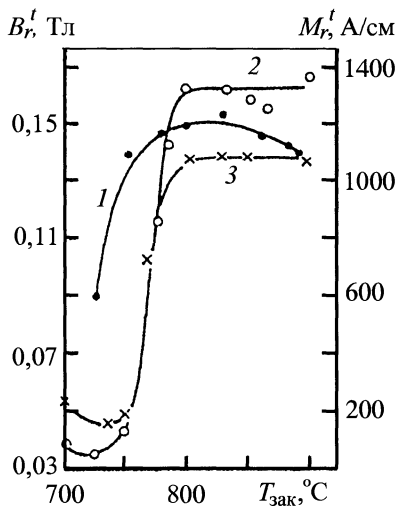


Рис. 13.18. Зависимости термоостаточной индукции M_r^t сталей 25X2Н4ВА (1) и 40X (2) при $H = 224$ А/см и термоостаточной намагниченности M_r^t стали 30ХРА (3) при $H = 280$ А/см от температуры закалки

Термокинетические кривые для разных температур отпуска различаются, т.е. термоостаточная намагниченность образцов по-разному устойчива к действию температур отпуска. По характеру изменения термоостаточной намагниченности при отпуске можно судить о правильности протекания процессов и прогнозировать качество отпущенных изделий.

Значения M_r^t (рис. 13.20), измеренные в начале (кривая 1) и в конце (кривая 2) изотермической выдержки, могут однозначно характеризовать процессы, происходящие при отпуске во всем исследованном интервале температур, в то время как остаточная намагниченность M_r (кривая 3) и коэрцитивная сила данной стали при повышении температуры отпуска изменяются неоднозначно. Таким образом, регистрация значения M_r^t изделия в определенных моменты времени отпуска τ позволяет решить задачу контроля качества термической обработки в тех случаях, ког-

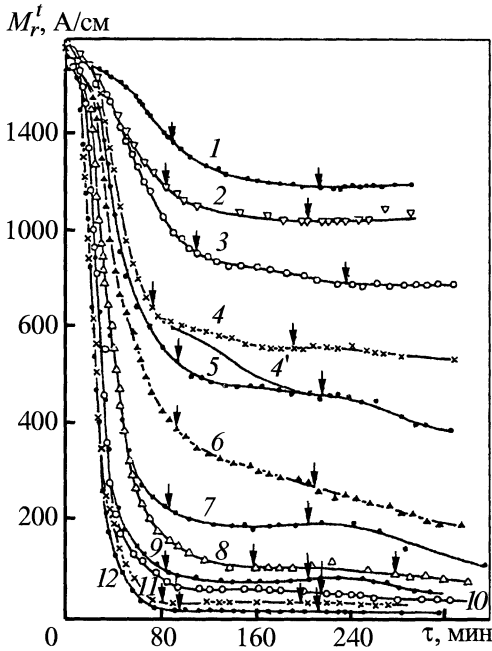


Рис. 13.19. Термокинетические кривые термомагнитной намагниченности стали 65С2ВА при разных значениях $T_{отп}$, °С: 1 – 150; 2 – 200; 3 – 250; 4 – 300; 4' – переход с кривой 4 (300 °С) на кривую 5 (350 °С); 5 – 350; 6 – 400; 7 – 450; 8 – 500; 9 – 560; 10 – 600; 11 – 650; 12 – 700

да классические методы, например коэрцитиметрические, не могут быть использованы.

Используя термокинетические кривые $M_r^t(\tau)$, можно не только контролировать качество отпуска, но и в определенных пределах корректировать процесс отпуска с учетом изменения исходного состояния и колебаний химического состава стали. Если предварительно определить термокинетическую кривую $M_r^t(\tau)$, которую будем считать стандартной и для которой прочностные свойства, например твердость, соответствуют середине технологически допустимого интервала, то отклонения кинетических кривых от стандартной (неправильно выбрана температура отпуска, различная исходная темпе-

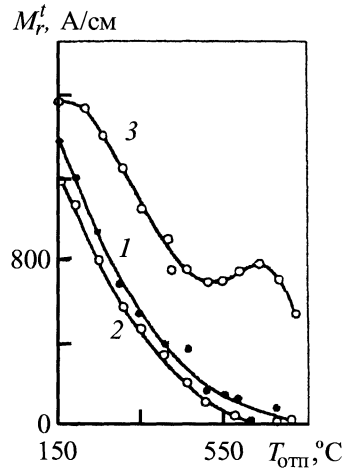


Рис. 13.20. Зависимость термомагнитной намагниченности стали 65С2ВА, измеренной в точках начала (1), конца (2) изотермической выдержки и после охлаждения образцов до комнатной температуры (3), от температуры отпуска

ратура металла, колебания химического состава) будут свидетельствовать о возможном получении некачественного изделия. Если различие термокинетических кривых установлено в ранний период отпуска, например в конечной точке нагрева изделия до заданной температуры, то можно выполнить корректировку технологического процесса отпуска.

Так, рис. 13.19 иллюстрирует возможность регулирования процесса термической обработки по измерению значения ΔM_r^t . Допустим, в процессе отпуска детали при 350 °С было обнаружено, что значение M_r^t (кривая 4') выше стандартного (кривая 5), тогда по полученной разности $\Delta M_r^t = M_{r,ст}^t - M_r^t$ определяют необходимую величину повышения температуры ΔT нагрева печи. Увеличив температуру нагрева, следят, чтобы вновь полученная термокинетическая кривая 4' совпала со стандартной 5; в противном случае необходимо провести дополнительную корректировку температуры.

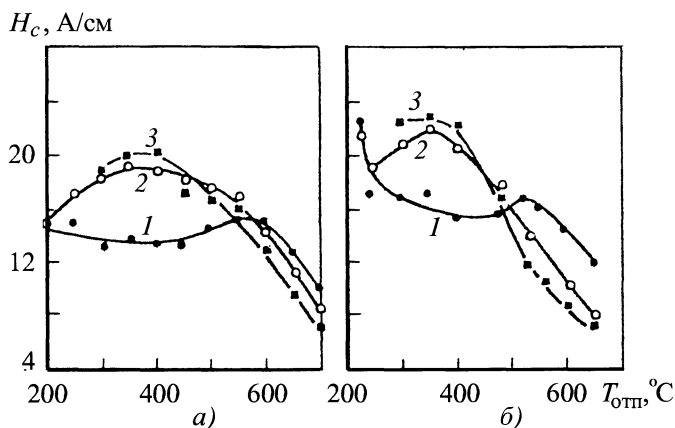


Рис. 13.21. Зависимость коэрцитивной силы сталей 45ХНМФА (а) и ШХ15 (б) от температуры отпуска при температуре измерения 20 (1), 220 (2) и 300 °С (3)

В отличие от предыдущего метода, контроль структурного состояния отпущенных изделий возможен при намагничивании и измерении магнитных свойств в условиях повышенной температуры или непосредственно при термической обработке. Предложено контролировать качество отпущенных изделий по значению коэрцитивной силы, измеренному при температурах 220 ... 300 °С. Физической предпосылкой применения данного способа служит изменение характера зависимости H_c от $T_{отп}$, когда температура изделия превышает 210 °С. Смещение максимума H_c , который наблюдается для $T_{отп} = 500 \dots 600$ °С при комнатных температурах измерения H_c , в область низких температур отпуска – 300 ... 400 °С (рис. 13.21) связывают с исчезновением ферромагнитных свойств цементита и изменением вследствие этого магнитостатической энергии карбидных включений. Данный метод НК позволяет контролировать изделия, которые подвергают отпуску при 400 ... 700 °С.

Рассмотренный выше метод требует специального нагрева изделий до температуры 220 ... 250 °С или измерения H_c при этих температурах в момент охлаждения изделий после отпуска. В отличие от него предложено измерять магнитные свойства

изделий в заданные моменты времени непосредственно в процессе отпуска. По измеренным значениям намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, соответствующим заданным точкам термокинетических кривых, можно прогнозировать качество отпуска изделий (рис. 13.22). Закономерности изменения M'_s от $T_{отп}$ (кривые 1) в начале и в конце изотермической выдержки различаются. В начале изотермической выдержки в области низких и средних температур M'_s изменяется неоднозначно, причем для стали 40ХА диапазон немоного изменения M'_s наибольший, а для стали 8ХФ наименьший. Далее для всех сталей значение M'_s монотонно уменьшается при увеличении температуры отпуска. В конце изотермической выдержки интервал монотонного изменения M'_s увеличивается: для стали 40ХА он составляет 400 ... 650 °С, для стали 50РА – 350 ... 650 °С, а для стали 8ХФ M'_s монотонно убывает во всем интервале температур отпуска. Измеренные значения M_s после отпуска повторяют хорошо известные закономерности поведения намагниченности насыщения в зависимости от температур отпуска для этих марок сталей.

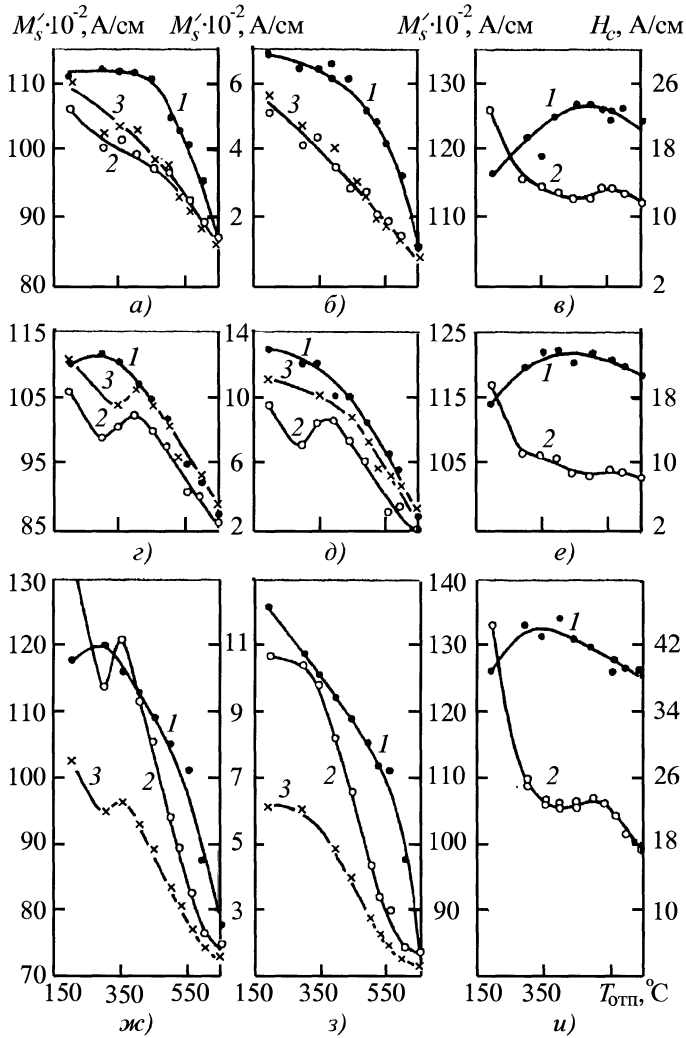


Рис. 13.22. Зависимости намагниченности насыщения (1), остаточной намагниченности (2) и коэрцитивной силы (3) в точках начала (а, г, ж), конца (б, д, з) изотермической выдержки и после охлаждения до комнатной температуры (в, е, и) для сталей 40ХА (а-в), 50РА (г-е) и 8ХФ (ж-и) от температуры отпуска

Аналогичные заключения можно сделать, анализируя характер поведения остаточной намагниченности M_r' (кривые 2) и коэрцитивной силы H_c (кривые 3) в процессе отпуска на разные температуры (см. рис. 13.22). Значения M_r' и H_c , измеренные в начале изотермической выдержки, монотонно убывают в интервале тем-

ператур отпуска 400 ... 650 °С для сталей 40ХА и 8ХФ и в интервале 450 ... 650 °С для стали 50РА. При измерении M_r' и H_c в конце изотермической выдержки для сталей 50РА и 40ХА интервал их монотонного изменения незначительно расширяется, а для стали 8ХФ монотонное уменьшение M_r' наблюдается во всем интервале тем-

ператур отпуска – от 250 до 650 °С. Закономерности зависимости M'_r от $T_{отп}$ (см. рис. 13.22, *в, е, и*), измеренные при комнатной температуре, аналогичны закономерностям зависимости H_c от $T_{отп}$.

Как и в случае термоэстаточной намагниченности, термокинетические кривые M'_r и H_c также можно использовать для корректировки процесса отпуска с учетом возможных изменений исходного состояния и колебаний химического состава сталей. Наиболее подходящим параметром для целей неразрушающего контроля качества отпуска является коэрцитивная сила, поскольку она практически не зависит от коэффициента размагничивания. Рис. 13.23 иллюстрирует возможность регулирования процесса термической обработки по измеренному значению коэрцитивной силы H_c . Термокинетическая кривая 1 снята для образца из стали 40ХА, отпущенного при $T_{отп} = 540$ °С, кривая 2 – для образца с $T_{отп} = 580$ °С.

Допустим, что в процессе отпуска детали при 580 °С был обнаружен недогрев, т.е. значение H_c выше значения $H_{cст}$ для стандартной детали, отпущенной при 580 °С. Увеличив температуру в печи до необходимого значения, перейдем на стандартную кривую 2 (по кривой 3) и в конечном результате получим изделие с необходимыми свойствами.

Предположим, что допущен другой вид брака – перегрев изделия на небольшую температуру (кривая 4). Стандартной кривой является зависимость $H_c(\tau)$ при $T_{отп} = 540$ °С). В этом случае, уменьшив температуру в печи, в процессе выдержки можно достичь значения коэрцитивной силы, соответствующего стандартной кривой 1 и также получить качественное изделие. Но если при отпуске произошел значительный перегрев изделия или перегрев на небольшую температуру обнаружен слишком поздно, то задача исправления брака становится более трудной, так

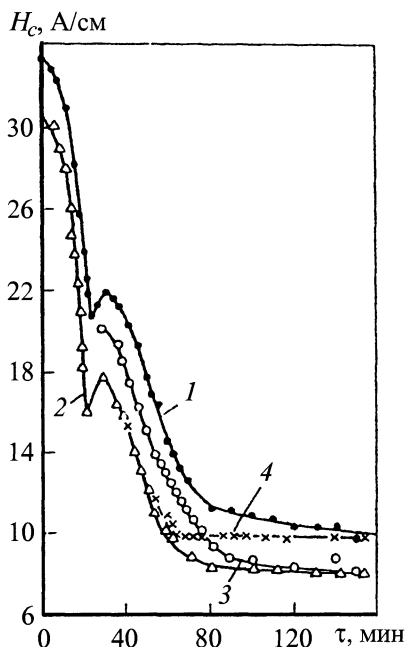


Рис. 13.23. Зависимость коэрцитивной силы стали 40ХА от времени отпуска при разных значениях $T_{отп}$:

1 – 540 °С; 2 – 580 °С; 3 – переход с кривой изотермической выдержки 540 °С на кривую 580 °С; 4 – обратный переход с 580 °С на 540 °С

как произошедшие дополнительные фазовые изменения и структурные превращения уменьшают вероятность получения качественного изделия или вообще исключают ее.

Исследование устойчивости магнитных состояний к воздействию температуры открывает новые возможности в области неразрушающего магнитного контроля качества термической обработки стальных изделий. В некоторых случаях возможен переход от пассивных к активным методам контроля, т.е. методы контроля могут стать составной частью технологического процесса термической обработки изделий, что позволит обеспечить изготовление изделий со строго заданными механическими характеристиками.

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Магнитные и электромагнитные методы, предназначенные для контроля структуры и механических свойств материалов, полуфабрикатов и изделий, нашли широкое применение в металлургической, машиностроительной, химической и аэрокосмической промышленности. Для решения задач структуроскопии ферромагнитных изделий применяют в основном следующие методы: коэрцитиметрические, измерения остаточной индукции, магнитной проницаемости, с использованием магнитоупругих эффектов, электромагнитные, токовых резонансных и многочастотные (высших гармоник и магнитошумовые). По каждому из перечисленных методов ведутся разработки средств неразрушающего контроля, использование которых позволяет решить большинство задач НК, стоящих перед современной промышленностью. Недостатком в применении разрабатываемых средств является то, что они, как правило, не имеют метрологической аттестации, поэтому их массовое использование и серийный выпуск затруднены. Разработанные стандарты практически не охватывают такую широкую область, как контроль физико-механических свойств (за исключением стандартов на контроль качества проката).

14.1. КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Коэрцитиметрические методы контроля благодаря высокой чувствительности к структурным изменениям и фазовым превращениям, достаточной простоте, значительной точности, слабой зависимости от геометрических размеров и возможности проведения измерений в локальных участках изделий получили наиболее широкое распространение из всех

магнитных методов НК.

В первых коэрцитиметрах были использованы *магнитометрические* принципы определения нулевого магнитного момента изделия в приложенном поле. Так, А.В. Нифонтов применил в заводских условиях коэрцитиметр магнитометрического типа для контроля подшипниковых колец. В предложенном приборе кольцо намагничивают и перемагничивают с помощью соленоида 1 со вставленным внутрь сердечником 2 из трансформаторной стали (рис. 14.1, а). При контроле кольцо 3 вводили в соприкосновение с сердечником 2, пропускали через намагничивающую обмотку 1 ток и намагничивали кольцо. После уменьшения намагничивающего тока до нуля подавали размагничивающий ток обратной полярности, плавно увеличивая его от нуля до такого значения, при котором магниточувствительный элемент 4 (магнитная стрелка) будет сориентирована в положение, которое соответствовало ее исходному состоянию (вдоль направления магнитного поля Земли).

Измеренная таким образом сила размагничивающего тока пропорциональна коэрцитивной силе кольца. Для увеличения чувствительности применяют дифференциальную схему измерения коэрцитивной силы, добавив еще один соленоид с сердечником и стандартное изделие, что снижает требования к стабильности тока питания в намагничивающих обмотках.

При использовании магнитометрического метода регистрации коэрцитивной силы необходимо измерять небольшие значения напряженности магнитного поля рассеяния, что требует создания высокочувствительных преобразователей. С появлением феррозондовых преобразовате-

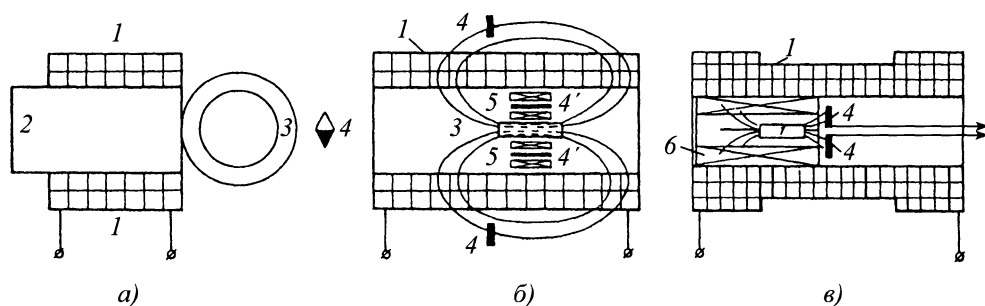


Рис. 14.1. Намагничивающие устройства для измерения коэрцитивной силы в коэрцитиметрах Нифонтова (а), Ферстера (б) и в приборе "Кобальт-1" (в):

1 – намагничивающее и размагничивающее устройства; 2 – сердечник; 3 – образец; 4 – магниточувствительный элемент; 5 – компенсационные катушки; 6 – размагничивающий соленоид

лей и преобразователей Холла магнитометрические методы получили дальнейшее развитие.

Ф. Ферстер, используя феррозондовые преобразователи, разработал коэрцитиметр с большой чувствительностью. Для исключения влияния поля соленоида на результаты измерения поля рассеяния от образца, ферроэлементы зонда ориентировали перпендикулярно к силовым линиям размагничивающего поля соленоида (рис. 14.1, б) в нейтральной плоскости. Фирма "Институт д-ра Ф. Ферстера" выпускает коэрцитиметр "Коэрцимат", предназначенный для измерения значения H_c как магнитомягких, так и магнитожестких ферромагнетиков. Эти приборы имеют ручное и дистанционное управление, цифровую индикацию. Намагничивающий соленоид 1 и измерительный зонд 4 защищены от действия земного поля и внешних помех магнитомягким экраном, который автоматически размагничивается специальной катушкой после каждого цикла измерения. Для контроля очень мелких изделий применяют внутренние феррозонды 4', расположенные около детали, параллельно ей. Влияние размагничивающего поля компенсируется с помощью небольших катушек 5, намотанных на феррозонд и создающих встречное поле, равное по величине полю размагничивания. Диапазон измерения коэрцитивной

силы – 1,6 ... 100 000 А/м. Внутренние диаметры канала соленоида равны 41 и 62 мм при длине зоны однородного поля 170 и 120 мм соответственно. Минимальная масса контролируемого изделия – около 1 мг. Погрешность измерения не превышает 1 % измеряемого значения. Максимальное намагничивающее поле – 400 кА/м. Бесконтактный способ регистрации значения коэрцитивной силы позволяет достаточно легко автоматизировать процесс ее измерения, что очень важно при массовом контроле изделий.

Для контроля качества спекания высококоэрцитивных вольфрамкобальтовых твердых сплавов были разработаны коэрцитиметры "Кобальт-1". В этих приборах использовано импульсное намагничивание изделий в соленоиде (рис. 14.1, в). В приборе "Кобальт-1" схема импульсного однополупериодного намагничивания обеспечивает создание поля амплитудой 500 кА/м. Индикаторами нулевой намагниченности служат ферроэлементы зонда 4, включенные градиентометрически. Ферроэлементы размещены перпендикулярно к направлению канала размагничивающего соленоида 6. Диапазон измерения коэрцитивной силы – 0,4 ... 40 кА/м, основная погрешность измерений – 4 % (на пределе 40 кА/м – 5 %), время измерения – 6 с. Прибор имеет цифровую индикацию.

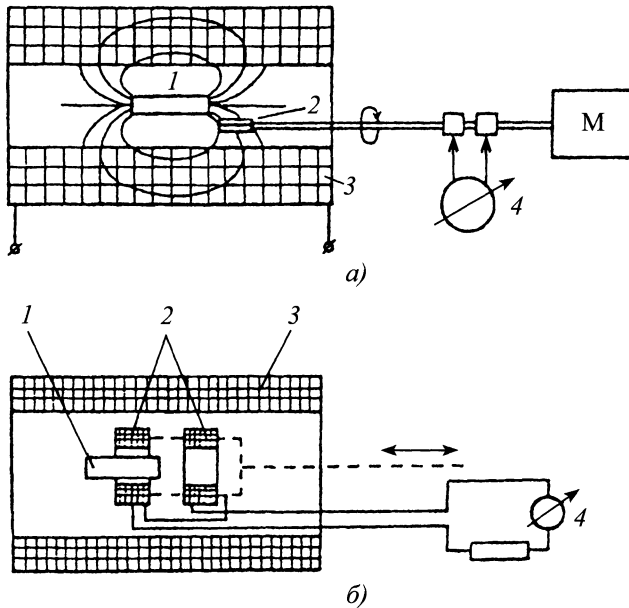


Рис. 14.2. Схема коэрцитиметра с измерительным генератором (а) и вибрационным преобразователем (б):

1 – образец; 2 – индукционные катушки; 3 – намагничивающее и размагничивающее устройства; 4 – измерительное устройство

В качестве чувствительного элемента для регистрации магнитного момента в коэрцитиметрах также широко используются преобразователи Холла. Конструктивно коэрцитиметры с преобразователями Холла незначительно отличаются от коэрцитиметров с феррозондовыми преобразователями.

Основным источником погрешности магнитометрического способа измерения коэрцитивной силы служит влияние внешних магнитных полей, главным из которых является магнитное поле при намагничивании.

Другим методом, позволяющим зарегистрировать нулевое значение намагниченности (индукции) и соответственно значение коэрцитивной силы ферромагнетика, является *индукционный* метод, основанный на измерении ЭДС в измерительной катушке, которая перемещается отно-

сительно исследуемого образца. Для определения коэрцитивной силы в открытой магнитной цепи используется измерительный генератор (рис. 14.2, а), в котором индукционная катушка 2 вращается вблизи измеряемого образца. Момент нулевого сигнала в измерительной катушке соответствует полю соленоида, равному коэрцитивной силе, которую определяют по силе тока в цепи соленоида I_c с учетом постоянной соленоида k :

$$H_c = kI_c. \quad (14.1)$$

Для измерения коэрцитивной силы используют устройства с вибрационными (индукционными) преобразователями, которые обладают высокой чувствительностью и точностью, поэтому с их помощью определяют H_c изделий, имеющих очень малую массу и небольшой магнитный момент. Коэрцитиметр (рис. 14.2, б) состоит

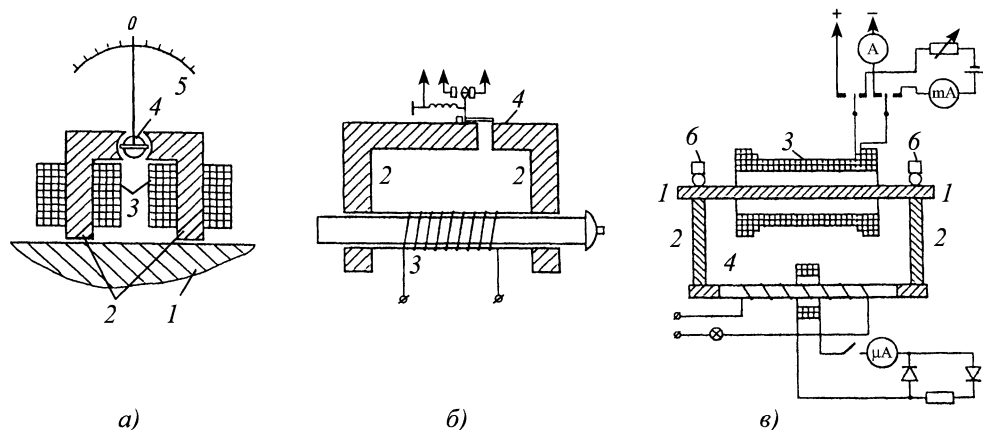


Рис. 14.3. Схемы преобразователей коэрцитиметров:

а – приставной электромагнит коэрцитиметра Михеева; *б* – приставной электромагнит коэрцитиметра Пискунова; *в* – установка Януса для измерения коэрцитивной силы листовой электротехнической стали

из соленоида 3, в центре которого на некотором расстоянии друг от друга расположены две одинаковые, жестко связанные измерительные катушки 2. Вибрация катушек может осуществляться либо с помощью электромотора – для крупногабаритных изделий, либо с помощью электродинамической системы – для небольших изделий. В отсутствие изделия в однородном магнитном поле соленоида результирующая ЭДС двух измерительных катушек, включенных последовательно-встречно, равна нулю. При помещении намагниченной детали 1 в одну из катушек в ней наводится ЭДС, которая может быть усилена до необходимого значения, протектирована и зарегистрирована измерительным устройством 4.

При контроле крупногабаритных изделий использование соленоидов для намагничивания не представляется возможным, поэтому были созданы приборы с намагничивающими и регистрирующими (измерительными) устройствами локального типа – коэрцитиметры с приставными электромагнитами. При локальном контроле показания регистрирующего устройства в лучшем случае пропорциональны значению коэрцитивной силы, при

этом на показания могут влиять состояние поверхности контролируемого участка изделия (шероховатость, наличие окислы, обезуглероженного слоя), толщина изделий в месте контроля, наличие зазора между поверхностью изделия и преобразователем, кривизна поверхности. Однако большая потребность в контроле крупногабаритных и поверхностно-упрочненных изделий, а также изделий сложной формы стимулировала разработку и создание коэрцитиметров с приставными намагничивающими устройствами.

В Институте физики металлов УрО РАН был разработан получивший наибольшее распространение коэрцитиметр с приставными электромагнитами КИФМ, который в различных модификациях с 1938 г. применяется для контроля качества термической обработки стальных и чугуновых изделий. В первых коэрцитиметрах был использован приставной П-образный электромагнит, в перемычку которого была вмонтирована подвижная рамка с током – по типу рамки в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы (рис. 14.3, *а*). При контроле полюсы 2 приставного электромагнита приводят в соприкосновения с контролируе-

мым участком массивного изделия 1; в намагничивающие катушки 3 подают импульс намагничивающего тока, затем направление тока в катушках изменяют на противоположное и увеличивают его от нуля до такого значения, при котором стрелка, жестко связанная с подвижной рамкой 4, покажет нулевое значение на шкале 5. По значению силы тока в обмотках катушек 3 определяют относительное значение коэрцитивной силы участка изделия.

В коэрцитиметре, разработанном А.И. Пискуновым (рис. 14.3, б), испытуемую деталь 1 помещают в катушку 3, а концы ее замыкают ярмом 2 из мягкого железа. В ярме имеется зазор шириной 1 ... 6,5 мм, заполненный неферромагнитным материалом. Над зазором на оси закреплена пластина 4 из трансформаторного железа, к пластине прикреплен рычажок с контактами, замыкающими цепи сигнальных ламп. Методика измерения на данном коэрцитиметре не отличается от рассмотренной выше, только момент соответствия силы тока размагничивания значению коэрцитивной силы регистрируют по моменту "отлипания" пластины 4 и сигналу соответствующего индикатора.

В практике контроля качества термической обработки магнитомягких материалов известен способ определения коэрцитивной силы листов трансформаторного железа. Лист 1 (рис. 14.3, в) вставляют в щель плоского соленоида 3 и намагничивают его полем 90 А/см. Ярмо 2 из трансформаторного железа толщиной 20 мм примыкает верхними плоскостями (полюсами) к испытуемому листу и замыкает внешнюю часть магнитной цепи через феррозонд 4. Прижимы 6 обеспечивают плотное прилегание испытуемого листа к полюсам по всей ширине листа (ширина ярма равна максимальной ширине испытуемых листов). Для регистрации магнитного потока использован феррозонд 4 обычного рамочного типа, возбуждаемый переменным током промышлен-

ной частоты через лампу накаливания, измерительная обмотка которого подключена к фазочувствительному индикатору. После намагничивания ток в соленоиде отключают, и включают ток размагничивания, увеличивая его до значений, соответствующих нулевому показанию феррозонда. По значению размагничивающего поля определяют коэрцитивную силу с учетом постоянной соленоида ($H_c = kI_c$). При установленном заранее значении силы тока размагничивания, соответствующем максимально допустимой коэрцитивной силе для данной марки электротехнической стали, процесс контроля ускоряется и достигает 100 ... 300 листов в час.

Значительное повышение быстродействия и увеличение точности измерения коэрцитиметра с приставным электромагнитом достигнуто благодаря применению в качестве индикатора намагниченности рамочного феррозонда, встроенного в перемычку П-образного электромагнита.

Базовым прибором для контроля качества термической обработки, глубины и твердости поверхностно упрочненных изделий по значению коэрцитивной силы является коэрцитиметр КИФМ-1. Прибор снабжен преобразователями двух типов: I – с сечением полюсов 12 × 28 мм и расстоянием между полюсами 32 мм, II – с сечением полюсов 5 × 15 мм и расстоянием 25 мм. Для решения специальных задач контроля изготавливают приставные магниты других размеров. Процесс намагничивания автоматизирован: после включения кнопки "Измерение" обеспечивается цикл намагничивания, состоящий из серии импульсов магнитной подготовки. Установка тока размагничивания – ручная с помощью регулирующих сопротивлений. Диапазон измерения коэрцитивной силы – 1,5 ... 44 А/см. Минимальные размеры контролируемого изделия: по длине – от 30 мм, по сечению – от 3 мм². Погрешность измерения силы тока размагничивания не превышает 5 %, время одного из-

мерения – не более 2 с. Прибор КИФМ-1 аттестуется по стандартным образцам коэрцитивной силы (СОКС-1).

На основании детального исследования магнитной цепи П-образного электромагнита коэрцитиметра разработан способ уменьшения погрешности определения коэрцитивной силы при изменении зазора между полюсами и изделием. Способ заключается в том, что на индикатор феррозонда подается постоянное напряжение смещения и напряжение, пропорциональное силе тока размагничивания. При определенных соотношениях этих напряжений зависимость силы тока размагничивания $I_{рс}$ от зазора δ уменьшается в 10 раз по сравнению с обычным подключением индикатора. Возможно некоторое уменьшение влияния неконтролируемых зазоров путем введения небольшого начального зазора с помощью неферромагнитной прокладки.

Предложен способ введения дополнительной компенсационной обмотки, размещенной в перемычке П-образного электромагнита и создающей магнитный поток, противоположный размагничивающему потоку, причем ток через компенсационную обмотку пропорционален току размагничивания. При некотором отношении токов в компенсационной и размагничивающей обмотках показания коэрцитиметров практически не зависят от зазора в достаточно широком диапазоне ее изменения.

Дальнейшее совершенствование коэрцитиметров направлено на повышение локальности измерений контролируемой зоны и быстродействия, расширение динамического диапазона измеряемых коэрцитивных сил, унификацию приставных электромагнитов и их взаимозаменяемость, обеспечение измерения абсолютного значения коэрцитивной силы с отстройкой от рабочего зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью и автоматизацию измерительных операций.

14.2. ПРИБОРЫ НК ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОСТАТОЧНОЙ ИНДУКЦИИ

В методах контроля, основанных на измерении остаточной магнитной индукции изделий, подразумевается измерение не остаточной индукции B_r вещества, из которого изготовлено изделие, а остаточной индукции тела или кажущейся остаточной индукции B'_r . Многие типоразмеры изделий имеют небольшое отношение длины к поперечному размеру (не более 20). При таких отношениях размеров проницаемость формы мала и выполняется соотношение

$$B'_r = \frac{1}{\mu_0} mH_c, \quad (14.2)$$

т.е. измеряемая остаточная индукция пропорциональна коэрцитивной силе изделия. При локальном намагничивании массивных изделий, когда намагничивают изделие в небольшом объеме перпендикулярно к плоскости поверхности, коэффициент размагничивания намагниченного участка поверхности изделия весьма велик и соотношение (14.2) также справедливо. Таким образом, методы контроля по значению остаточной магнитной индукции очень близко примыкают к коэрцитиметрическим методам.

Для контроля малогабаритных изделий по значению кажущейся остаточной индукции B'_r используют разомкнутую магнитную цепь. Существуют два метода регистрации значения B'_r : индукционный и магнитометрический.

В практике разработки средств магнитного контроля широкое применение нашел метод определения остаточной магнитной индукции *по измерению максимального значения двуполярного импульса ЭДС*, возникающего при поступательном движении изделия с фиксированной скоростью через измерительную катушку. Этот способ обладает высокой производительностью, но прямо пропор-

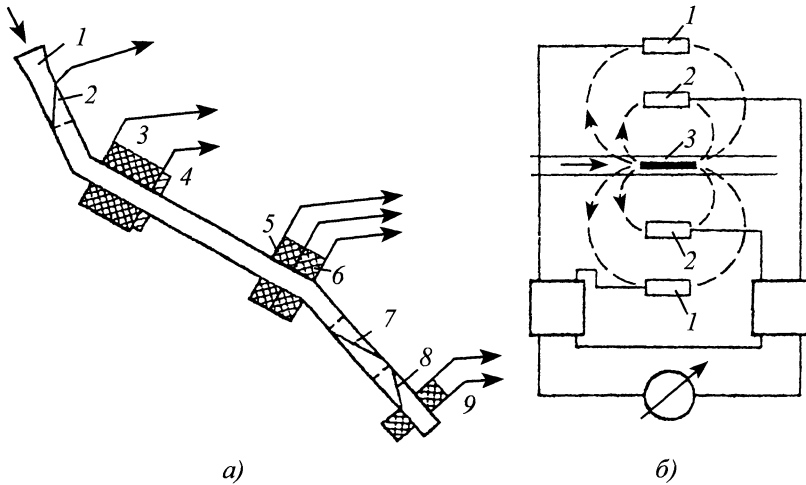


Рис. 14.4. Схемы измерительных устройств для регистрации остаточного магнитного момента изделий:
а – установка ТАМ-1; *б* – прибор Ферстера

циональная зависимость величины сигнала от скорости движения изделий служит источником больших погрешностей в определении значения магнитной индукции. Точность измерения остаточной индукции движущихся изделий удастся существенно повысить, если измерять не амплитуду, а интеграл по времени однополярного импульса наводимой ЭДС.

Для контроля малогабаритных изделий в открытой магнитной цепи методом измерения максимального значения ЭДС в измерительной катушке разработаны установки серии ТАМ. Работа установки ТАМ-1 (рис. 14.4, *а*) заключается в следующем. Деталь попадает в воронку входного бункера 1 и замыкает контакт 2 пускового устройства. После этого в намагничивающий соленоид 3 подается ток от выпрямителя.

Деталь останавливается под действием магнитного поля соленоида и успокаивается 4, выполненного из магнитомягкой стали. Далее ток соленоида отключается и деталь под действием своего веса проходит через измерительные катушки 5 и 6, индуцируя в них импульсы. Амплитуда импульсов при постоянстве скорости дви-

жения детали прямо пропорциональна значению ее остаточной индукции. Каждая измерительная катушка связана через свой усилитель с соответствующим реле. В зависимости от значения остаточной индукции срабатывают реле "Твердая деталь" или "Годная деталь", и заслонки 7 или 8, связанные с этими реле, направляют деталь в соответствующий бункер. При прохождении "мягкой" детали индуцируемый импульс недостаточен для срабатывания реле, и заслонки, оставаясь в исходном положении, направляют детали в бункер для мягких деталей. Годные детали при выходе из измерительного устройства размагничиваются в переменном магнитном поле соленоида 9.

В ИФП АН Республики Беларусь разработан магнитный анализатор качества стальных изделий МАКСИ, предназначенный для измерения двух параметров: максимального значения магнитного потока в движущемся изделии, намагничиваемом в магнитном поле заданной амплитуды, и остаточного потока Φ , после завершения намагничивания. Контроль осуществляется в процессе свободного падения изделия через область с магнит-

ным полем, создаваемым подключенной к источнику постоянного тока намагничивающей катушкой. Первая измерительная катушка, предназначенная для измерения максимального магнитного потока в изделии при намагничивании, расположена в центральном сечении намагничивающей катушки. При движении сквозь область с намагничивающим полем контролируемое изделие пересекает плоскость сечения первой измерительной катушки, вызывает изменение во времени сцепленного с ней магнитного потока $\Phi_1(t)$ и индуцирует в ней ЭДС e_1 . Выходя из зоны действия намагничивающего поля, контролируемое изделие пересекает плоскость сечения второй измерительной катушки, предназначенной для измерения остаточного магнитного потока в изделии, вызывает изменение сцепленного с ней магнитного потока $\Phi_2(t)$ и индуцирует в ней ЭДС e_2 . Значения $e_1(t)$ и $e_2(t)$ поступают на выходы идентичных измерительных каналов, принцип действия которых основан на выделении из ЭДС измерительных катушек однополярного импульса напряжения и аналоговом интегрировании выделенного импульса.

Для уменьшения линейных размеров преобразователя и исключения влияния намагничивающего поля на изделие при измерении параметра Φ , использована специальная система компенсирующих катушек, включенных последовательно-встречно с намагничивающей катушкой в цепь источника намагничивающего тока. Система компенсирующих катушек обеспечивает компенсацию намагничивающего поля в пространстве, окружающем вторую измерительную катушку. Метрологическое обеспечение прибора МАКСИ основано на имитации движения ферромагнитного изделия сквозь преобразователь прибора.

Другим способом измерения магнитной индукции контролируемой детали является метод *регистрации магнитного*

момента с помощью феррозондовых преобразователей. Феррозонды располагают в первом или втором гауссовом положении (на продолжении оси, вдоль которой производят намагничивание, или в плоскости магнитной нейтрали изделия). В приборах НК большое распространение получила схема расположения зондов во втором гауссовом положении, при котором они не мешают сквозному прохождению контролируемого изделия через преобразователь. Ф. Ферстер предложил следующую структурную схему расположения феррозондов (рис. 14.4, б). Феррозонды 2 регистрируют поле рассеяния от изделия 3, а феррозонды 1 компенсируют влияние внешнего магнитного поля. Расположение осей феррозондов 2 на одинаковом расстоянии от оси транспортного канала позволяет значительно снизить влияние поперечного смещения изделия на величину сигнала. Феррозондовые установки имеют следующие преимущества перед индукционными установками: возможность контролировать детали сложной формы при их фиксированном положении по отношению к феррозонду и отсутствие зависимости результата контроля от скорости перемещения детали.

Разработанный Ф. Ферстером метод *локального намагничивания* изделия (точечного полюса) реализуется путем соприкосновения и последующего удаления от изделия постоянного магнита стержневого, чаше- или подковообразного вида. На рис. 14.5, а показан один из наиболее распространенных преобразователей подобного типа. Подпружиненный цилиндрический постоянный магнит вводится в соприкосновение с поверхностью изделия и создает точечный полюс. Значение кажущейся остаточной индукции (магнитного пятна) определяют по измеренному феррозондами значению тангенциальной составляющей напряженности полей рассеяния. Градиентометрическое включение феррозондов позволяет компенсировать внешние однородные магнитные поля.

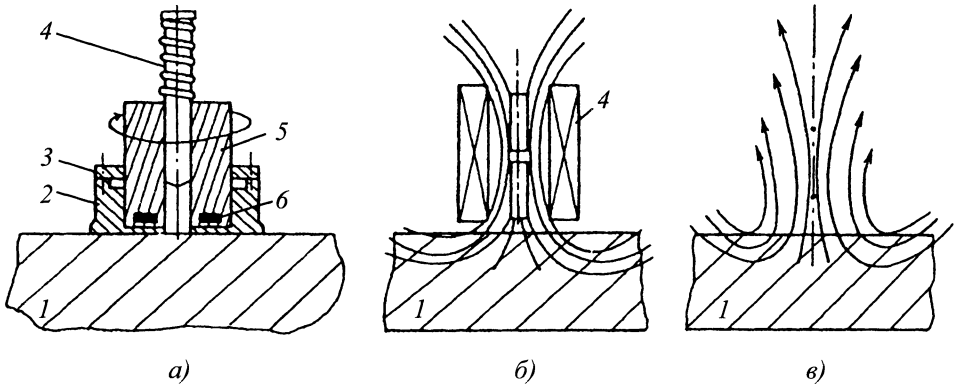


Рис. 14.5. Локальный магнитный контроль методом точечного полюса:

a – преобразователь с использованием постоянного магнита;

1 – изделие; *2* – неподвижное основание; *3* – шкала угла поворота; *4* – постоянный магнит; *5* – вращающийся держатель зондов; *б* – феррозонды; *б* – преобразователь с использованием импульсного намагничивания; *в* – схематическое изображение распределения остаточного поля при локальном намагничивании изделия

При вращении преобразователя с феррозондом вокруг оси удастся оценить анизотропию магнитных свойств электротехнических сталей, а также механических свойств, например, листовых материалов. Размер контролируемой детали и ее форма оказывают влияние на показания прибора, если преобразователь расположен вблизи кромки изделия или установлен на неровной поверхности. Для уменьшения влияния краевого эффекта на преобразователь используют не цилиндрический магнит, а постоянный магнит в виде чашки. Приборы с локальным намагничиванием в виде точечного полюса хорошо зарекомендовали себя при контроле массивных изделий на однородность структуры, контроле листового проката, при определении степени отбела отливок из серого чугуна и при оценке твердости труб, получаемых методом центробежного литья.

Для определения качества термической обработки подшипниковых колец большого размера разработан прибор магнитного контроля СКДМ-1. Устройство (рис. 14.6) состоит из двойного Н-образного электромагнита с рамочным феррозондом *4* в перемычке. С одной стороны

электромагнита находится магнитный эквивалент (стандартный образец) *3*, с другой – контролируемое кольцо *5*. При поступлении тока в катушки намагничивания *2* феррозонд *4* регистрирует разность значений индукций насыщения стандартного и контролируемого колец. Контролируемое кольцо приводится во вращение роликами *б*. Электромагнит, в свою очередь, своими роликами (на рисунке не показано) катится по контролируемой поверхности. От полюсов электромагнита при включении тока намагничивания остается магнитная "дорожка" *а*. Феррозонды *1* регистрируют поля рассеяния от "дорожки", которые пропорциональны коэрцитивной силе контролируемого участка изделия.

Опыт эксплуатации намагничивающих устройств с электромагнитами показывает, что на величину сигнала преобразователя значительно влияет зазор между сердечником электромагнита и поверхностью изделия. Высокая производительность контроля при меньшей чувствительности к зазору и местоположению детали получена в импульсном коэрцитиметре ИК-1 (или ИК-2), структурная схема кото-

рого приведена на рис. 14.7. В приборе предусмотрено измерение $H_c \sim B_r$. Между ярмом П-образного электромагнита и изделием устанавливается начальный зазор 8 ... 10 мм. Его наличие снижает чувствительность к последующим небольшим отклонениям зазора при контроле и перемещениям деталей относительно полюсов. Для намагничивания используют приставной электромагнит 1, через обмотку 2 которого пропускают импульсы тока (форма импульсов показана справа). Значение остаточной индукции регистрируется прибором 4 с помощью магнитометра на преобразователе Холла 3.

Дальнейшее развитие метод контроля с намагничиванием участка изделия накладным соленоидом получил в работах М.А. Мельгуя. На основе приближенных расчетов он получил выражения для градиентов нормальной составляющей поля от намагниченного пятна. Расчеты показали, что в общем случае градиент поля сложным образом зависит от многих магнитных характеристик. Градиент нормальной составляющей поля пятна однозначно связан с величиной H_c при условии, что намагничивающее поле значительно превышает коэрцитивную силу изделия. Чувствительность разработанных им приборов типа ИМА (импульсный магнитный анализатор) к зазору между преобразователем и поверхностью изделия значительно ниже, чем у коэрцитиметров с приставными электромагнитами, и составляет примерно 2 % на 0,1 мм зазора в интервале его изменения от 0 до 4 мм.

Приборы импульсного локального контроля типа ИМА используют для определения механических свойств тонколистового проката. Согласно схеме на рис. 14.5, б, намагничивание контролируемого участка изделия осуществляется серией однополярных импульсов тока (от одного до десяти), пропускаемых через соленоид.

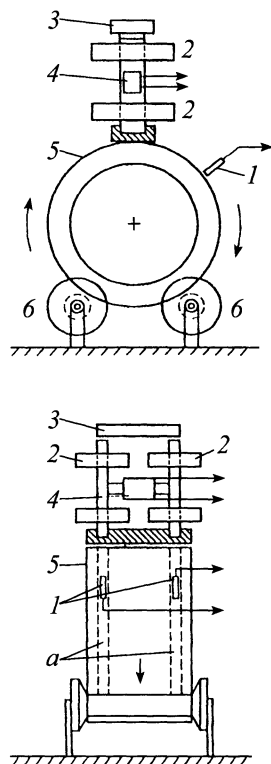


Рис. 14.6. Устройство для магнитного контроля подшипниковых колец большого размера

Выборочный контроль, осуществляемый с помощью приборов ИМА по небольшому числу листов из партии, при неоднородности свойств в рулоне не позволяет гарантировать качество всего металла. Для непрерывного контроля механических свойств движущегося листового материала толщиной 0,14 ... 10 мм предложена установка ИМПОК-1, в которой также использован импульсный магнитный метод. Принцип работы установки заключается в периодическом импульсном намагничивании контролируемого листа, движущегося между двумя намагничивающими соленоидами, симметрично расположенными относительно плоскости его движения (по конструкции аналогичны соленоиду на рис. 14.5, б). Соленоиды включены так, что создаваемые ими поля направлены навстречу друг другу. Сигнал

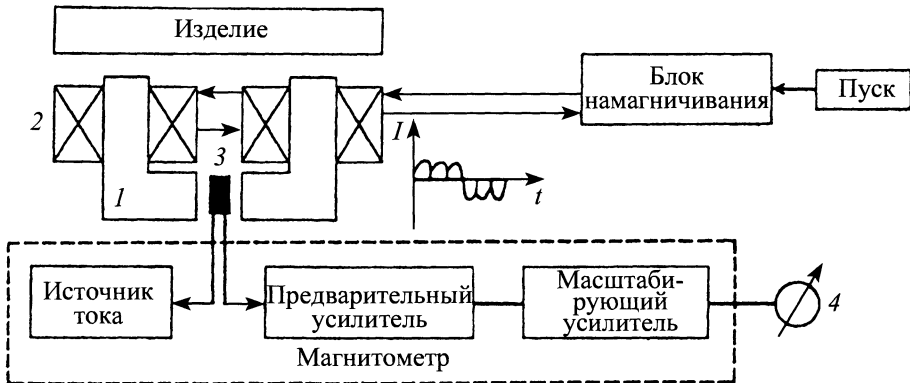


Рис. 14.7. Структурная схема прибора ИК-1

феррозондов, пропорциональный сумме градиентов нормальных составляющих поля (остаточной намагниченности), записывается самописцем. Дополнительная погрешность, обусловленная смещением листа ± 10 мм, при скорости движения $0,5 \dots 5$ м/с не превышает 5 %.

Возможность контроля проката при смещениях листа ± 20 мм реализована за счет определения контролируемых параметров не по сумме градиентов, как это было сделано в приборе ИМПОК-1, а по их усредненным (среднее арифметическое или среднее геометрическое) максимальным значениям. Дальнейшее совершенствование метода контроля на основе разнесения во времени процессов измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности (максимального значения), создания градиента напряженности поля стандартного источника и их сравнения позволило улучшить метрологические характеристики и создать следующую модификацию прибора. Метрологическая проверка установки проводится с помощью меры градиента магнитного поля без применения контрольных образцов. Питание меры осуществляется от специально разработанного имитатора, позволяющего совместно с мерой моделировать в пространстве и во времени магнитное поле,

градиент которого подобен градиенту поля локально намагниченного участка листа при его перемещении мимо феррозондов.

Применение метода точечного полюса для измерения коэрцитивной силы. Как следует из изложенного выше, метод состоит в импульсном намагничивании контролируемого участка изделия, последующем размагничивании и определении напряженности размагничивающего поля, необходимого для снижения остаточной намагниченности до нуля. Определение нулевого значения остаточной намагниченности магнитного пятна производится по нормальной составляющей вектора напряженности поля рассеяния. В целях исключения влияния аксиальной составляющей напряженности поля намагничивающего соленоида нуль-орган коэрцитиметра выполнен в виде феррозондового градиентометра, расположенного внутри соленоида. Основные технические данные коэрцитиметра ИКС-102: диапазон измерения коэрцитивной силы – $1,5 \dots 100$ А/см, основная погрешность измерения – не более ± 5 %. Коэрцитиметр позволяет выполнять измерения в локальной области контролируемого изделия под слоями неферромагнитных защитных покрытий (лакокрасочных, гальванических и т.п.) толщиной до 0,2 мм. При большей толщине за-

щитных покрытий возрастает погрешность измерения. Для повышения чувствительности к контролируемым параметрам и помехозащищенности феррозондов предложена такая схема расположения зондов, при которой один из полуэлементов расположен в намагничивающем устройстве, а другой – вне зоны действия импульсных полей.

14.3. ПРИБОРЫ НК ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОСТАТОЧНОЙ ИНДУКЦИИ ЧАСТИЧНО РАЗМАГНИЧЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Коэрцитиметрические приборы и приборы по измерению остаточной индукции не могут быть использованы для контроля структурного состояния и прочностных характеристик изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % после средне- и высокотемпературного отпуска. В гл. 13 показана принципиальная возможность использования для этих целей таких магнитных характеристик, как релаксационная коэрцитивная сила тела H_{re} , коэрцитивная сила частично размагниченого состояния H_c^- , остаточные индукции B_d^- и B_d^+ (см. рис. 13.2).

Оптимальным условием получения состояния остаточной намагниченности является квазистатический режим намагничивания до насыщения с последующим плавным уменьшением поля до нуля, который реализован в приборе РКИФМ-1 (релаксационный коэрцитиметр). Работа этого прибора заключается в следующем. Размагниченое изделие помещают в магнитное поле соленоида, плавно возрастающее до H_{max} . Затем поле уменьшают до нуля, и изделие приобретает остаточную намагниченность, которую разрушают постоянным магнитным полем противоположного направления H_{re}^- . Если уменьшить величину поля H_{re}^- до нуля, то индукция будет изменяться по кривой возврата.

Измерение релаксационной коэрцитивной силы H_{re} представляет определенную трудность, поэтому в приборе РКИФМ-1 предусмотрена регистрация вторичной остаточной намагниченности M_d^- , имеющей при размагничивающих полях, близких по величине к H_{re} , однозначный характер зависимости от температуры отпуска. Значение остаточной намагниченности фиксируют при помощи феррозонда путем измерения тангенциальной составляющей полей рассеяния, по значению которой косвенно определяют прочностные характеристики контролируемых изделий.

Прибор состоит из намагничивающего устройства, представляющего собой соленоид с двухсекционной обмоткой (аналогично изображенному на рис. 14.1, б), блока управления намагничиванием и размагничиванием, блока регистрации полей рассеяния и цифрового микроамперметра. При контроле изделий обеспечивается автоматический цикл намагничивание–размагничивание с установленными заранее значениями намагничивающих H_{max} и размагничивающих H_{re}^- полей. Время контроля одной детали – 6 ... 7 с. Рис. 14.8 иллюстрирует возможность контроля прибором РКИФМ-1 отпущенных изделий из стали 40Х. Этот прибор предназначен для контроля небольших по размерам деталей, поскольку для намагничивания относительно коротких изделий ($l/d < 8$) требуются большие магнитные поля, а при контроле массивных деталей необходимы мощные источники питания.

Существенно повысить производительность контроля и уменьшить мощность прибора можно за счет отмены операции предварительного размагничивания и использования импульсного поля. При импульсном намагничивании важно правильно подобрать такие формы импульса и его длительность, учитывая электричес-

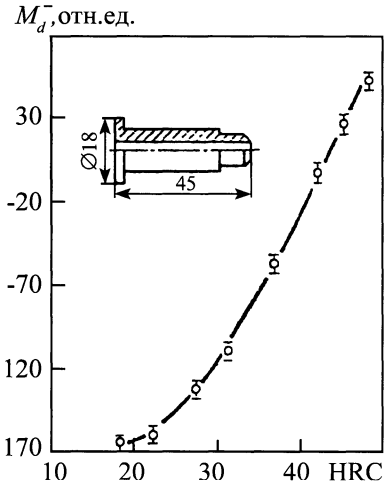


Рис. 14.8. Показания прибора РКИФМ-1, пропорциональные магнитному моменту детали M_d^- из стали 40X, в зависимости от твердости

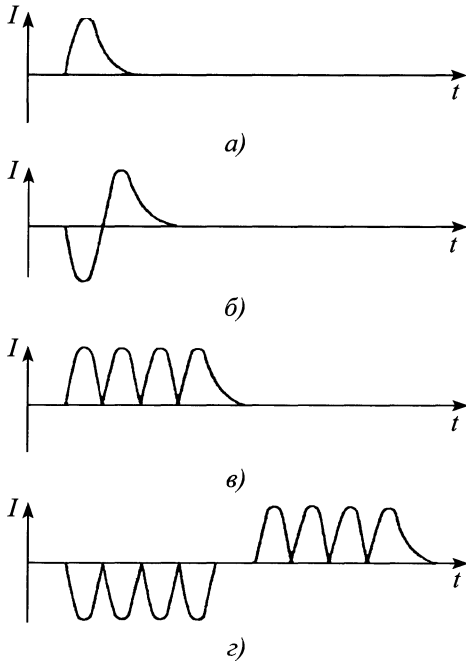


Рис. 14.9. Форма импульсов тока: а – однополярный; б – двуполярный; в – однополярный групповой; з – двуполярный групповой

кие параметры намагничивающей системы, чтобы состояние намагниченности не зависело от магнитной предыстории детали и стабильно повторялось.

Стабильность получения состояния остаточной намагниченности оценивали по повторяемости значений остаточной намагниченности при многократных намагничиваниях образца, находящегося в разных исходных магнитных состояниях. Намагничивание образцов осуществляли импульсами от сети переменного тока, которые подавали в обмотку соленоида через понижающий трансформатор и блок тиристоров. С помощью схемы управления блоком тиристоров через обмотку соленоида пропускали импульсы тока различной формы (рис. 14.9). Для исключения обратных импульсов тока, возникающих при окончании действия намагничивающего импульса вследствие индуктивного характера нагрузки, была применена диодная защита. Процесс затухания тока в обмотке соленоида отражен на рис. 14.9, где задний фронт положительных импульсов изображен плавно спадающим до нуля.

Процесс намагничивания изучен на образцах из сталей двух марок, имеющих разные магнитные свойства (табл. 14.1) после соответствующей термической обработки. Образцы перед испытанием приводили в различные исходные магнитные состояния с намагниченностью, равной нулю, $+M_r$, $-M_r$; первое достигалось размагничиванием переменным магнитным полем, второе и третье – намагничиванием в электромагните до значений M_s или $-M_s$.

Для сравнения эффективности намагничивания импульсами тока разной формы было выбрано минимальное значение напряженности намагничивающего поля H_s , выше которого относительный остаточный магнитный момент $m = M_r / M_{r, \max}$ оставался постоянным (равным m_s), т.е. не зависящим от магнитной

14.1. Коэрцитивная сила H_c , намагниченность насыщения M_s , марка стали и геометрические размеры образцов

Номер образца	H_c , А/см	M_s , А/см	Марка стали	Размеры, мм
1	11,4	16 380	40X	9 × 9 × 62
2	15,0	16 530	40X	9 × 9 × 62
3	29,5	15 900	40X	9 × 9 × 62
4	51,0	11 300	ЧС5ВИ	10 × 10 × 62

14.2. Значения H_s , кА/м, и m_s образцов при намагничивании импульсами разной формы

Номер образца	Форма импульса по рис. 14.9							
	а		б		в		г	
	H_s	m_s	H_s	m_s	H_s	m_s	H_s	m_s
1	60	1,00	60	0,94	55	0,97	50	0,97
2	60	0,93	60	0,95	50	0,91	50	0,91
3	>100	0,88	80	0,93	70	0,90	50	0,90
4	>100	1,00	66	0,97	80	1,00	55	1,00

предыстории образца (табл. 14.2). Можно заключить, что намагничивание однополярными импульсами (см. рис. 14.9, а, в) в целом менее эффективно, чем намагничивание двухполярными импульсами (см. 14.9, б, г), т.е. значения H_s для однополярных импульсов, как правило, выше, чем для двухполярных. Повидимому, это связано с эффектом магнитной подготовки, выражающимся в возрастании максимальной и остаточной намагниченности цикла магнитного гистерезиса при повторных намагничиваниях неизменным по величине магнитным полем. Этот эффект приводит к насыщению относительной остаточной намагниченности при меньших по амплитуде двухполярных импульсах.

При импульсном намагничивании до любого из значений напряженности поля

значение m меньше единицы (см. табл. 14.2), а для квазистатического режима намагничивания $m_s = 1$, т.е. действие импульсного магнитного поля на ферромагнитное тело отличается от квазистатического режима намагничивания, поскольку наряду с постоянной составляющей тока во время прохождения импульса в обмотке соленоида присутствуют и переменные составляющие. Однако, несмотря на то, что $m < 1$, это значение сохраняется стабильным.

При сравнении значений H_s (см. табл. 14.2) видно, что для образца 4 они в целом выше, чем для первых трех. Это объясняется, во-первых, большей магнитной жесткостью этого образца; во-вторых, несколько увеличенным коэффициентом размагничивания по сравнению с образцами 1–3; в-третьих, большим количеством неферромагнитной фазы, т.е. большим

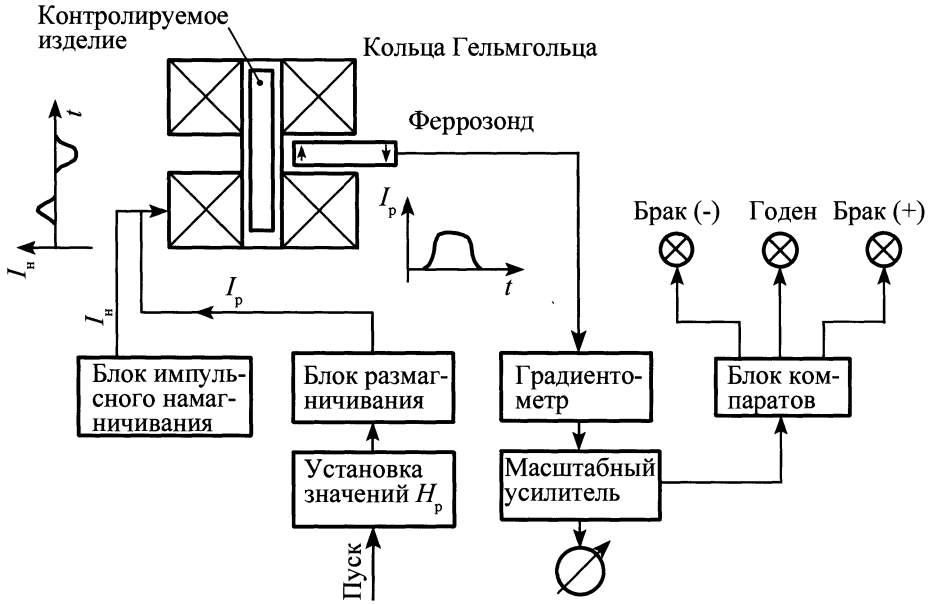


Рис. 14.10. Структурная схема прибора РК-2

значением внутреннего размагничивающего поля. Сравнивая значения H_s при намагничивании импульсами разной формы (см. табл. 14.2), видим, что меньшее значение H_s соответствует форме импульса по рис. 14.9, *г*. Такая форма наиболее эффективна при намагничивании импульсами от сети переменного тока. При реализации данного способа намагничивания амплитуду импульсного поля следует брать с запасом, т.е. $H > H_s$.

Наиболее простым в техническом решении является намагничивание контролируемого изделия двуполярным одиночным импульсом от сети переменного тока, которое реализовано в блоке намагничивания прибора РКИФМ-2. В нем применена защита от импульсов обратного тока в целях получения более стабильных показаний прибора при контроле. При дальнейшей модернизации прибора РКИФМ-2 для намагничивания крупногабаритных изделий используется двуполярный групповой импульс тока.

Дальнейшей модификацией приборов серии РКИФМ является прибор РК-2 (рис. 14.10). Намагничивание небольших изделий проводится в соленоиде от импульсного блока намагничивания двумя разнополярными импульсами тока, причем первый является подготовительным. Амплитуда тока намагничивания в соответствии с рекомендациями, приведенными выше, выбрана такой, чтобы исключить влияние магнитной предыстории и тем самым устранить операцию предварительного размагничивания изделий перед контролем. Частичное размагничивание изделия осуществляется импульсом размагничивающего поля заданной амплитуды H_{pe}^- .

Намагничивающее устройство прибора состоит из колец Гельмгольца 2 (рис. 14.11, *а*).

При контроле очень мелких изделий l держатель феррозондов 3 можно приближать к изделию, в результате чего достига-

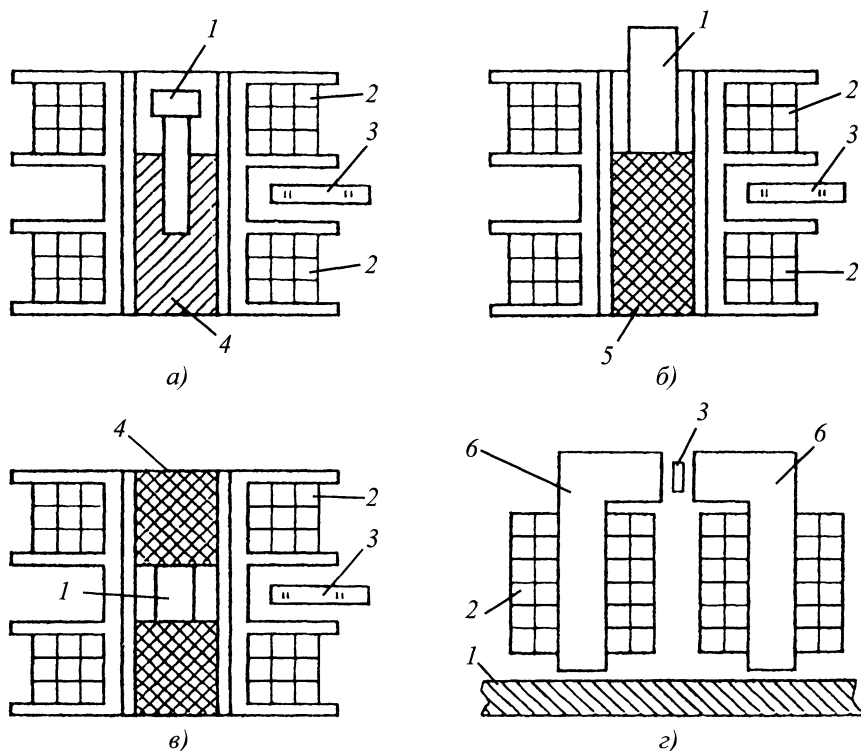


Рис. 14.11. Преобразователи для измерения остаточного магнитного момента изделий:

а – в приборе РК-2; *б, в* – в составной цепи прибора РК-2; *з* – в приборе РК-3

ется необходимая чувствительность к измеряемому магнитному моменту. Для контроля деталей сложной формы в канале намагничивающего устройства закрепляют ложемент 4, с помощью которого фиксируют положение изделий относительно держателя феррозондов. Цикл намагничивание–размагничивание осуществляется автоматически. Значение импульса тока размагничивания подбирают опытным путем на деталях с известными механическими свойствами. Напряженность поля в центре соленоида при силе тока 1 А равна 99,5 А/см, амплитуда намагничивающего импульса поля – около 1,2 кА/см.

При разработке методики определения качества термической обработки по измерению остаточной намагниченности

M_d^- необходимо учитывать влияние геометрических размеров изделий на характер зависимости $M_d^-(T_{отп})$. Эти вопросы рассмотрены на примере термически обработанных цилиндрических образцов из стали 40Х диаметром 7,5 мм и длиной $l_0 = 10 \dots 60$ мм. Изучение зависимостей $M_d^-(T_{отп})$ при изменении коэффициента размагничивания образцов показывает, что с уменьшением длины снижается значение остаточного магнитного момента и уменьшается разрешающая способность метода при контроле отпущенных изделий. Для образца с $l_0/d \approx 1,33$ ($l_0 = 10$ мм) обнаружено, что напряженность магнитного поля 1,2 кА/см недостаточна для получения стабильного состояния M_d^- . По-

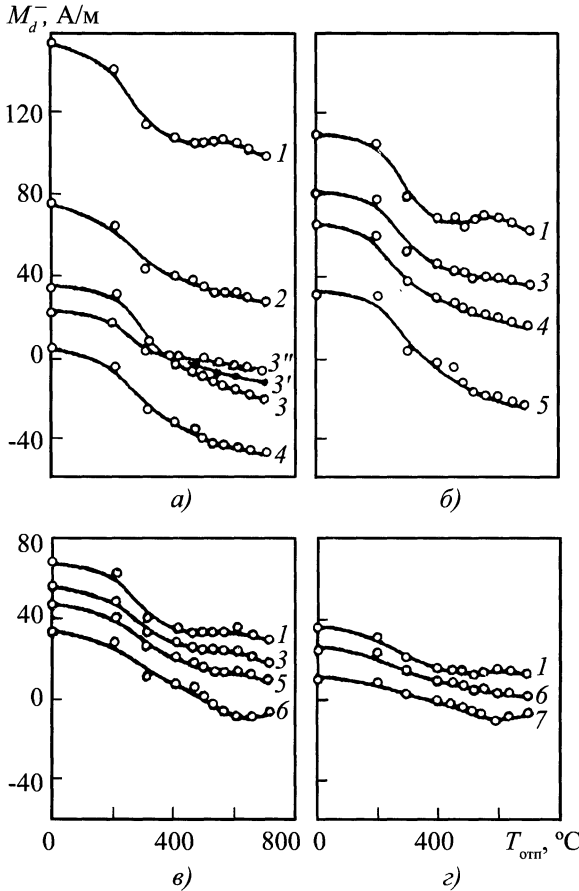


Рис. 14.12. Зависимость $M_d^-(T_{отп})$ для образцов длиной $l_0 = 10$ мм в составной полузамкнутой цепи с магнитомягким сердечником диаметром $d_c = 7,5$ мм и длиной $l_c = 50$ (а), 40 (б), 20 (в) и 10 мм (г) при разных значениях H_{pe}^- , А/м: 1 – 0; 2 – 14,9; 3 – 29,8; 4 – 44,7; 5 – 59,6; 6 – 119,2; 7 – 357,6

сколько значения M_d^- для образцов малой длины (большой коэффициент размагничивания) невелики, как и их изменения при отпуске (см. рис. 14.12, г), то нестабильность получения состояния остаточной намагниченности и последующего значения M_d^- приводит к большой погрешности при определении качества термической обработки.

Увеличить значение результирующего магнитного момента, а также умень-

шить напряженность внешнего намагничивающего поля при контроле деталей с большим коэффициентом размагничивания можно, используя составную полузамкнутую магнитную цепь (см. рис. 14.11, б) из детали 1 и магнитомягкого сердечника 5, в качестве которого использовали цилиндры разной длины l_c диаметром 7,5 мм из отожженного арможелеза. Образец приводили в контакт с торцом сердечника, помещенного в соленоид.

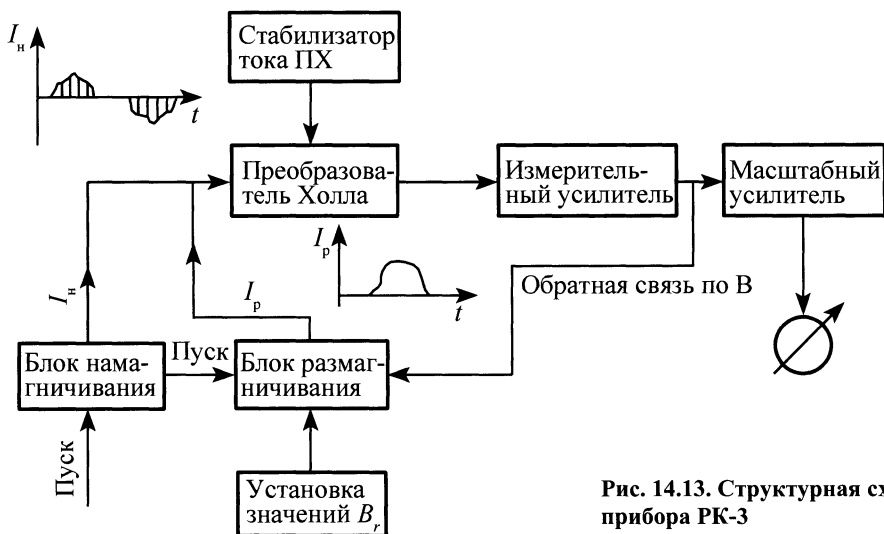


Рис. 14.13. Структурная схема прибора РК-3

Установлено, что с увеличением длины сердечника разрешающая способность метода контроля качества отпуска изделий по измерениям значения M_d^- возрастает (рис. 14.12).

Это позволяет рекомендовать применение составной полузамкнутой магнитной цепи для контроля качества термической обработки мелких деталей. Стабильность значений M_d^- при многократных измерениях свидетельствует о том, что выбранная амплитуда намагничивающего поля достаточна для намагничивания такой цепи.

При использовании составной магнитной цепи необходимо учитывать возможное влияние зазора между контролируемой деталью и сердечником. На рис. 14.12, а приведены зависимости $M_d^-(T_{отп})$ при внешнем размагничивающем поле $H_{pe}^- = 29,8 \text{ A/cm}$ для составной магнитной цепи, состоящей из образца и сердечника, при зазоре $\delta = 0,2$ и $1,2 \text{ мм}$ (кривые 3' и 3''). Влияние зазора наиболее сильно сказывается при низких и высоких значениях температуры отпуска. Влияние случайного зазора на результаты контроля можно уменьшить введением

начального зазора, равного 1 мм. Определение качества термической обработки изделий в составной магнитной цепи с неферромагнитной прокладкой приводит к снижению погрешности, связанной с неконтролируемыми изменениями ширины зазора до 2 мм.

Несколько иной преобразователь (см. рис. 14.11, з) использован в приборе РК-3 для контроля массивных изделий I . Преобразователь представляет собой П-образное ярмо b из магнитомягкого железа. В центральной части перемычки ярма выполнен зазор, в который помещен преобразователь Холла 3 . На стержнях ярма расположены последовательно-согласно включенные катушки намагничивания и размагничивания 2 .

В приборе предусмотрено измерение значения остаточной индукции B_d^- , получаемой после размагничивания двумя способами: первый – размагничивание до определенных значений wI_p^- , где w – число витков (аналог размагничивающего поля H_{pe}^- в открытой магнитной цепи); второй – до определенных значений индукции B_p^- на нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса. При обоих способах

размагничивания можно подобрать такие значения индукции B_p^- или силы тока I_p^- , при которых значения остаточной индукции B_d^- однозначно связаны с температурой отпуска. Влияние колебаний зазора между полюсами электромагнита и изделием на результаты контроля можно уменьшить, устанавливая начальный зазор или подбирая такое значение индукции B_d^- , при котором чувствительность B_d^- к изменению зазора была бы минимальной.

В приборе РК-3 намагничивание изделия осуществляется с помощью блока намагничивания (рис. 14.13) двумя разнополярными импульсами длительностью, равной четырем-пяти полупериодам сетевого напряжения, и амплитудой не менее 5 А. Форма намагничивающих импульсов тока также показана на рис. 14.13. Частичное размагничивание до фиксированных значений индукции в магнитной цепи преобразователя осуществляются импульсом от блока размагничивания, в котором поддерживается постоянное значение или амплитуды размагничивающего импульса тока, или индукции B_p^- .

Практически все изложенные выше способы контроля изделий с помощью приставных магнитных устройств реализованы в приборе МФМС-1, в котором предусмотрено измерение пяти магнитных характеристик: коэрцитивной силы, релаксационной коэрцитивной силы, остаточной индукции и остаточных индукций после частичного размагничивания точно-намагниченного изделия до посто-

янных значений напряженности магнитного поля H_p и индукции B_p .

С помощью этого прибора (после установки детали) автоматически выполняются следующие операции:

- магнитная подготовка контролируемой детали (в двукратное разнополярное намагничивание);
- намагничивание, осуществляемое одним импульсом, длительность которого может изменяться при необходимости;
- ручное определение значения коэрцитивной силы;
- автоматическое определение значения коэрцитивной силы изделия;
- дискретное изменение в магнитопроводе значений размагничивающего поля (тока) по нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса до заданных значений напряженности H_p или индукции B_p , используемое для определения вторичной остаточной индукции B_d^- частично размагниченного состояния контролируемой детали;
- цифровая индикация результатов контроля в виде значений размагничивающего тока или индукции в цепи электромагнита.

Метод измерения остаточной намагниченности после частичного размагничивания изделия (участка изделия), находящегося в состоянии остаточной намагниченности, постоянным или переменным магнитным полем, реализован в ряде приборов НК, которые успешно используются при контроле качества закалки и последующего отпуска изделий.

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

К основным видам поверхностного упрочнения относят поверхностную закалку стали с использованием различных методов нагрева изделия (пламенный, в электролитах, в расплавленных металлах и солях, лазерный, токами высокой и промышленной частот), химико-термическую обработку стали (цементация, азотирование, цианирование), а также упрочнение методом поверхностно-пластической деформации (гидро- и пневмодробеструйная, пневмодинамическая обработка, алмазное выглаживание, обкатыванием шариками и роликами).

Вследствие поверхностного разрушения при изнашивании выходит из строя 60 ... 80 % металлорежущих станков, тракторов, сельскохозяйственных, транспортных и других машин.

В настоящее время созданы, продолжают разрабатываться и совершенствоваться приборы для НК качества поверхностного упрочнения, которые могут использоваться в автоматических линиях контроля и в ряде случаев могут являться составной частью технологического процесса производства. Наибольшее распространение получили *магнитные и электромагнитные методы*. Для контроля стальных ферромагнитных изделий чаще всего используют методы, основанные на измерении таких магнитных характеристик, как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитная проницаемость или параметры скачков Баркгаузена.

Неразрушающий метод контроля глубины и прочностных характеристик упрочненного слоя основан на различии физических свойств сердцевины изделия и самого слоя. Чем больше это различие, тем более достоверен метод контроля.

15.1. СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ, УПРОЧНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Сущность способа *закалки* с помощью ТВЧ заключается в том, что металл в результате возбуждения в нем вихревых токов высокой частоты быстро разогревается. При этом распределение плотности тока по сечению неравномерно. Глубина проникновения тока без учета конфигурации изделия определяется частотой f , удельным электрическим сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью μ . В простейшем виде эта зависимость в системе СИ определяется выражением

$$\delta = 503\sqrt{\rho/(\mu f)}. \quad (15.1)$$

Неравномерное проникновение электромагнитного поля в металл приводит к неравномерному нагреву изделия по сечению. Если прервать нагрев изделия и быстро его охладить, то в сечении закаленного изделия можно выделить три структурные зоны:

1) поверхностно упрочненный слой; металл этой зоны нагревается выше температур A_{c3} , в результате чего после закалки образуется практически мартенситная структура;

2) переходный слой, характеризующийся нагревом металла в области температур $A_{c1}-A_{c3}$, при этом полного растворения углерода в твердом γ -растворе получить не удается, поэтому структура слоя после закалки изменяется от мартенситной до ферритно-перлитной;

3) исходная структура, которая нагревается до температур, значительно ниже A_{c1} , и поэтому в ней практически никаких структурных изменений не происходит.

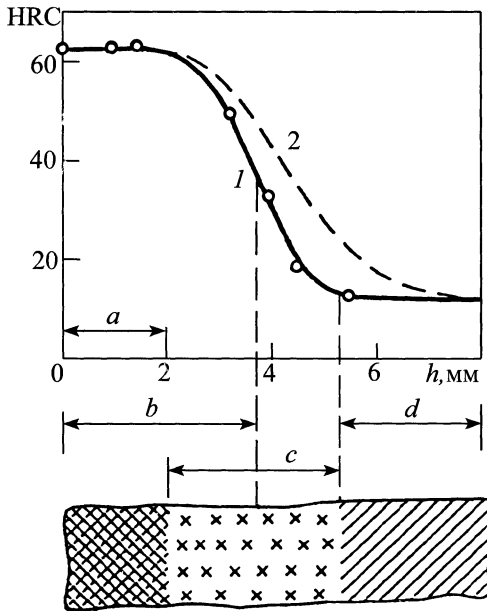


Рис. 15.1. Распределение твердости по глубине закаленного слоя образца из стали 45:

a — глубина упрочненного слоя с высокой твердостью; *b* — глубина упрочненного слоя до переходной зоны с 50%-ной мартенситной структурой; *c* — переходная зона; *d* — сердцевина изделия

Одним из важных параметров упрочненного слоя является его глубина. В зарубежной литературе глубина закаленного слоя определяется как кратчайшее расстояние от поверхности до участка шлифа с твердостью, которая отличается от твердости сердцевины на (ϵ^{-1}) -ю часть разности значений твердости на поверхности и в сердцевине. Согласно международному стандарту ИСО 3754–76, под эффективной глубиной закалки при индукционном нагреве понимается расстояние между поверхностью изделия и слоем, в котором твердость по Виккерсу (HV) под нагрузкой 9,8 Н равна пределу твердости (0,8 минимальной поверхностной твердости HV).

Достаточно распространенным способом определения глубины упрочненного слоя является металлографический, при

котором расстояние отсчитывается от поверхности до участков с 50 %-ной мартенситной структурой в переходном слое. Поскольку для разных марок сталей известна твердость изделий, имеющих в структуре 50 % мартенсита, то, используя эти данные, можно определять глубину закаленного слоя исходя из измерений твердости по сечению упрочненной детали. Рис. 15.1 иллюстрирует закономерность изменения твердости с глубиной закаленного слоя; кривые 1, 2 получены при разной термической обработке.

Глубина закаленного слоя зависит от способов закалки, а при сложной форме детали еще от ее геометрии и формы индуктора. Таким образом, аттестация глубины закаленного слоя представляет определенную трудность. На практике пользуются некоторым усредненным значением глубины закалки, определяемым металлографически.

Другим распространенным способом поверхностного упрочнения, известным с давних пор, является *цементация* стали. При цементации поверхностный слой стали насыщается углеродом. В результате этого в низкоуглеродистой стали образуется прочный высокоуглеродистый поверхностный слой при относительно мягкой и вязкой сердцевине изделия. Скорость диффузии углерода в феррите наименьшая, в аустените наибольшая, поэтому процесс цементации проводят при температурах выше точки A_{c3} (900 ... 970 °С). Поскольку цементация — диффузионный процесс, то повышение температуры цементации сопровождается увеличением глубины слоя, а содержание углерода в поверхностном слое определяется пределом растворимости углерода в аустените при данной температуре согласно диаграмме Fe–C.

По окончании процесса цементации в диффузионном слое получается аустенит с переменным составом по углероду, концентрация которого при температуре цементации 900 °С изменяется от 1,2 ... 1,3

до 0,1 ... 0,2 % С. Распределение концентрации углерода по глубине является функцией температуры, продолжительности цементации, активности карбюризатора и других факторов. При охлаждении от температуры цементации до комнатной в поверхностном слое в зависимости от содержания в нем углерода происходят различные превращения. Наиболее насыщенная углеродом поверхностная зона (> 0,8 ... 0,9 % С) имеет структуру, характерную для заэвтектоидных сталей (перлит + цементит), далее идет эвтектоидная зона с содержанием углерода 0,8 % С и доэвтектоидная зона (< 0,7 % С), которая плавно переходит в структуру сердцевины. За техническую глубину цементированного слоя обычно принимают сумму размеров заэвтектоидной, эвтектоидной и половины доэвтектоидной зон; иногда принимают глубину до первых участков феррита. Чаще всего цементацию проводят с таким расчетом, чтобы содержание углерода в поверхностной зоне не превышало 1,1 ... 1,2 %, поскольку большее его содержание приводит к образованию вторичного цементита, что придает слою повышенную хрупкость.

Необходимый уровень эксплуатационных свойств достигается закалкой цементированных изделий, при которой в поверхностном слое получается высокоуглеродистый мартенсит с высокой твердостью и износостойкостью, а в сердцевине изделия сохраняется низкая твердость и высокая вязкость. Для снятия внутренних напряжений, как это принято для высокоуглеродистых сталей, цементированные изделия подвергают низкотемпературному отпуску.

Термическая обработка цементированных деталей имеет особенности, которые необходимо учитывать при установлении режима обработки. Длительные выдержки детали при высоких температурах в процессе цементации вызывают рост зерна, поэтому для получения хороших механических свойств и высокой твердо-

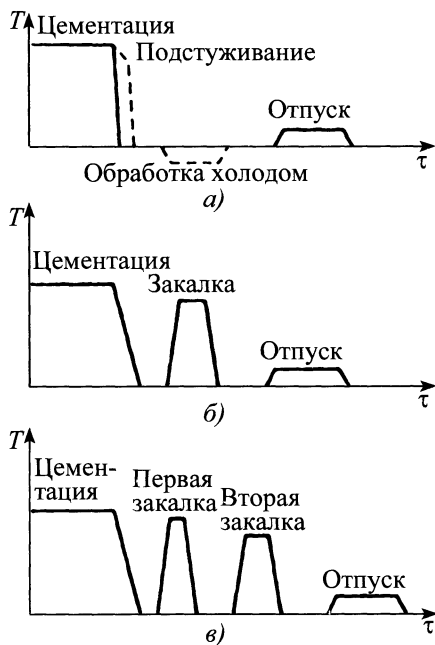


Рис. 15.2. Режимы термической обработки цементированных изделий

сти необходимо последующей термической обработкой добиться устранения в цементированном слое карбидной сетки, возникающей при пересыщении его углеродом. В зависимости от назначения детали и требований, предъявляемых к поверхностному слою, применяют разные способы термической обработки деталей после цементации (рис. 15.2).

1. Для ответственных деталей, основным эксплуатационным требованием которых является высокая твердость, а остальные механические характеристики не имеют большого значения, применяют закалку непосредственно с температуры цементационного нагрева (см. рис. 15.2, а). Вследствие значительного роста зерна аустенита при цементационном нагреве в структуре закаленного слоя образуются крупноугольчатый мартенсит и крупнозернистая структура сердцевины. Полученные после закалки механические свойства весьма низкие. В закаленном слое содержится большое количество остаточ-

ного аустенита, снижающего твердость. Преимущества закалки с цементационного нагрева – низкая стоимость и незначительные деформации деталей. Отмеченные недостатки – крупнозернистость строения и повышенное содержание остаточного аустенита – можно устранить путем применения наследственно-мелко-зернистой стали, использования подстуживания при закалке, т.е. осуществления закалки с температур 750 ... 800 °С и обработки изделий холодом (штриховые линии).

2. При повышенных требованиях к структуре и свойствам деталей охлаждение после цементации (см. рис. 15.2, б) осуществляют на воздухе, потом в зависимости от марки стали вновь нагревают до температур выше точки A_{c3} (850 ... 900 °С) и закачивают, а затем отпускают при 150 ... 170 °С. При этом обеспечивается полная перекисталлизация на поверхности и в сердцевине изделия. Одновременно с измельчением зерна происходит растворение цементитной сетки по границам зерна. После закалки структура стали будет более мелкозернистой и однородной по сравнению с закалкой от температуры цементационного нагрева.

3. Для обеспечения высоких механических свойств в поверхностном слое и в сердцевине изделия используют двойную закалку с последующим низкотемпературным отпуском (см. рис. 15.2, в). Первую закалку от температур 850 ... 900 °С применяют для измельчения структуры сердцевины и устранения цементитной сетки в поверхностном слое; иногда первую закалку заменяют нормализацией. Вторую закалку проводят от более низких температур, используемых для высокоуглеродистых сталей (760 ... 800 °С). После закалки в поверхностном слое образуется мелкоигольчатый мартенсит с вкрапленным избыточным цементитом, что обеспечивает его высокую износостойкость. В сердцевине изделия в результате неполной закалки образуется мелкозернистая феррито-перлитная структура. В легирован-

ных сталях при полной закалке сердцевины структура состоит из мартенсита, при неполной – из мартенсита и феррита, однако в обоих случаях вследствие низкого содержания углерода сердцевина остается достаточно вязкой.

При поверхностном упрочнении увеличивается удельное электрическое сопротивление и сильно меняются магнитные свойства упрочненного слоя. Так, при закалке с помощью ТВЧ коэрцитивная сила закаленного слоя в 2 ... 4 раза больше коэрцитивной силы сердцевины изделий. Это объясняется тем, что структура сердцевины – феррит + перлит является "мягкой" в магнитном отношении ($H_c = 8 \dots 12$ А/см). Закаленный слой имеет структуру мелкоигольчатого мартенсита – "жесткую" в магнитном отношении, с высоким значением коэрцитивной силы ($H_c = 25 \dots 28$ А/см). Высокое значение H_c закаленного слоя объясняется теми же причинами, что и в случае объемной закалки стали.

При изучении магнитных свойств цементированного слоя и сердцевины установлено, что наибольшее различие этих свойств достигается после закалки. Как показано на модельных образцах, различие между значениями коэрцитивной силы цементированного слоя и сердцевины изделия может достигать 10 раз. Закономерности изменения физико-механических свойств цементированного слоя и сердцевины изделия при вариации температуры закалки (рис. 15.3) близки к рассмотренным закономерностям, характерным для заэвтектидных углеродистых и низкоуглеродистых слаболегированных сталей соответственно. После отпуска при 180 °С (см. рис. 15.3, б) общий характер закономерностей изменения свойств цементированного слоя от температуры закалки сохраняется: намагниченность насыщения M_s и твердость HRC закаленных цементированных слоев практически не изменяются, коэрцитивная сила H_c снижается на 20 ... 24 %, удельное электричес-

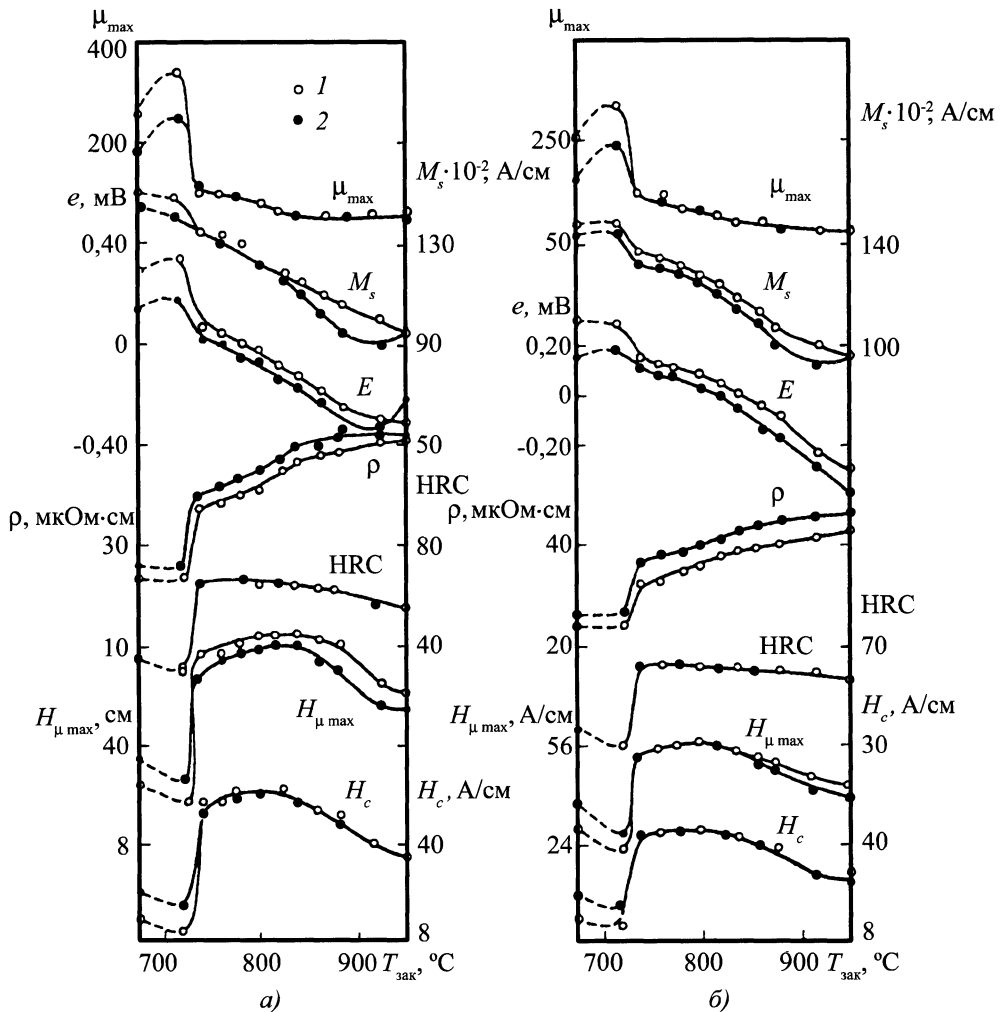


Рис. 15.3. Зависимости физико-механических характеристик цементированной стали 20XГР от температуры закалки (а) и после отпуски при 180 °С (б):
 1 – 0,18 % С, 0,18 % Si, 0,62 % Mn, 0,71 % Cr, 0,18 % Ni, 0,17 % Cu, 0,03 % S, 0,032 % P, 0,0041 % В; 2 – 0,22 % С, 0,31 % Si, 1,06 % Mn, 1,15 % Cr, 0,08 % Ni, 0,11 % Cu, 0,022 % S, 0,025 % P, 0,0037 % В

кое сопротивление ρ – на 14 ... 20 %. Аналогичные закономерности получены для сталей 20XГНР, 17XН2, 20XН3А и 17XН3МА, 12XН3А и 12XН2Н4А.

Неоднозначное изменение коэрцитивной силы цементированного слоя при вариации температуры закалки, как и в случае заэвтектонидных сталей, для повы-

шения достоверности контроля требует привлечения второго параметра – M_s , по значению которого можно оценивать количество остаточного аустенита в слое.

Цементированный слой имеет различную насыщенность углеродом, следовательно, разное количество карбидной фазы по его сечению. Увеличение в слое

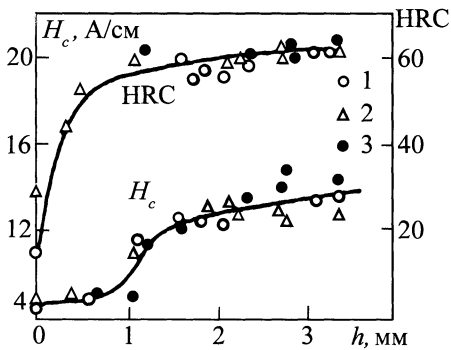


Рис. 15.4. Зависимости коэрцитивной силы и твердости стали 20ХНЗА после цементации от глубины цементированного слоя при слабой (1), нормальной (2) и сильной (3) активности карбюризатора

объема карбидной фазы, которая при перемагничивании препятствует смещению доменных границ, сопровождается повышением коэрцитивной силы. Начиная с некоторой глубины цементации h , наблюдается рост коэрцитивной силы по мере увеличения h (рис. 15.4). Постоянство коэрцитивной силы до глубин порядка 1 мм объясняется незначительным влиянием цементированного слоя на среднее значение коэрцитивной силы. С увеличением глубины цементированного слоя твердость также начинает расти и достигает некоторого предельного значения, соответствующего твердости цементированного слоя. Контроль глубины слоя непосредственно после цементации по значению коэрцитивной силы возможен, но вряд ли целесообразен из-за больших ошибок в определении глубины, вызванных неодинаковой скоростью охлаждения и, как следствие этого, различным структурным состоянием.

Закалка от температуры 900 °С приводит к образованию мартенситной структуры в цементированном слое и мартенситной или трооститной структуры сердцевины изделия. Поскольку при температурах закалки 850 ... 900 °С магнитные свойства сердцевины остаются практически постоянными, то основные их измене-

ния при различной глубине цементированного слоя определяются глубиной слоя и степенью его насыщенности углеродом. Увеличение насыщенности углеродом в слое сопровождается повышением количества остаточного аустенита и тем самым приводит к некоторому снижению твердости. Увеличение H_c с ростом глубины упрочненного слоя вызвано большей коэрцитивной силой этого слоя по сравнению с H_c сердцевины изделия. При этом H_c в определенных пределах пропорциональна глубине закаленного слоя (рис. 15.5, а). Основной причиной погрешности при определении глубины цементированных слоев по значению H_c является их различная насыщенность углеродом и, следовательно, различие в структуре слоев.

Вторая закалка (рис. 15.5, б), которая проводится при более низких температурах, изменяет соотношение фаз в цементированном слое. Понижение температуры аустенизации сопровождается незначительным снижением количества остаточного аустенита в стали, при этом могут повышаться значения M_s , HRC и понижаться значения ρ . Влияние разной насыщенности углеродом цементированных слоев проявляется, как и в предыдущем случае, в виде некоторого рассеяния точек около кривых.

Низкотемпературный отпуск при 180 °С эквидистантно снижает H_c и HRC и оставляет практически без изменения значения M_s (рис. 15.5, в). Контроль прочностных характеристик и глубины цементированного слоя после низкотемпературного отпуска также возможен, однако точность контроля после осуществления всех термических операций будет гораздо ниже, чем после каждой отдельной операции, вследствие суммирования возможных погрешностей после каждой операции термической обработки.

Упрочнение металла путем пластического деформирования поверхностного слоя получило название *поверхностного наклепа*. При наклепе в поверхностном

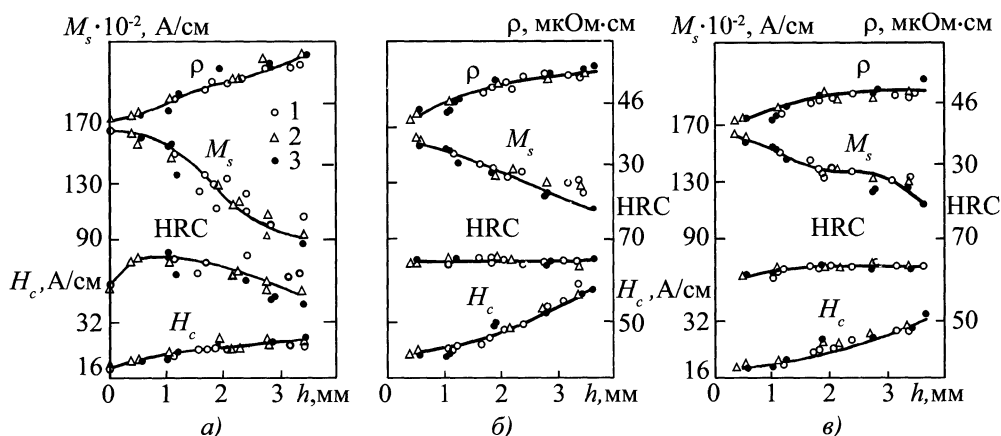


Рис. 15.5. Зависимости физико-механических характеристик стали 20ХНЗА от глубины цементированного слоя:

а – после первой закалки от 900 °С; *б* – после второй закалки от 800 °С; *в* – после второй закалки и отпуска при 180 °С; 1–3 – то же, что и на рис. 15.4

слое увеличивается число дефектов кристаллического строения, которые, уменьшая подвижность дислокаций, повышают сопротивление деформации и уменьшают пластичность. Наклеп сопровождается изменением физических свойств упрочненного слоя: так, коэрцитивная сила наклепанного слоя повышается, а магнитная проницаемость уменьшается.

Существование различия магнитных и электрических свойств упрочненного слоя и сердцевины изделия позволяет использовать магнитные и электромагнитные методы контроля для определения толщины и твердости упрочненного слоя. Магнитные и электромагнитные параметры НК качества упрочненного слоя должны нести информацию о слое в результате проникновения магнитного и электромагнитного полей на заданную глубину.

Можно указать два основных способа получения информации о свойствах слоя на определенной глубине:

1) намагничивание изделия в постоянных магнитных полях и определение магнитных характеристик на заданной глубине при помощи намагничивающих устройств определенной конфигурации;

2) применение в намагничивающих устройствах электромагнитных полей необходимой частоты.

15.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

При определении глубины и прочностных характеристик упрочненного слоя широкое распространение получили коэрцитиметрические методы. Глубина проникновения магнитного потока в изделие в основном зависит от геометрических размеров приставного электромагнита, поэтому, изменяя его размеры – площадь сечения полюсов, расстояние между ними и высоту полюса, можно получить различную глубину проникновения магнитного потока в изделие. Например, показания коэрцитиметра, сопоставленные с глубиной цементации и твердостью цементированного слоя и сердцевины (табл. 15.1), свидетельствуют о возможности контроля качества цементации тарелки клапана из стали 12ХНЗА. Для контроля используется приставной электромагнит с толщиной полюса $a = 5$ мм, шириной

15.1. Показания коэрцитиметра I_{pc} , глубина цементации h и твердость цементированного слоя (в числителе) и сердцевины (в знаменателе) тарелки клапана

I_{pc} , мА	h , мм	HRC	I_{pc} , мА	h , мм	HRC
7,0	—	23/4	25,0	1,28	60/38
10,5	—*	28/8	25,5	1,36	60/37
11,5	0,92**	48/15	27,0	2,09	60/34
12,5	1,27	32/28	28,0	1,23	60/33
13,5	0,36	59/27	31,0	1,44	63/39
13,0	0,91	57/25	32,0	1,54	64/31
18,0	1,05	62/38	34,0	1,64	64/40
21,0	1,20	62/34	38,0	0,60	57/44

* Незакаленное состояние.

** Сердцевина не прокалилась, имеется феррит.

$b = 15$ мм и расстоянием между полюсами $t = 25$ мм.

Тарелка клапана должна иметь глубину (толщину) цементированного слоя 1,1 ... 1,4 мм. После закалки и отпуска твердость цементированного слоя должна быть не ниже 56 ... 58 HRC и сердцевины – 20 ... 40 HRC. Качественно упрочненным деталям соответствуют показания коэрцитиметра $I_{pc} = 20$... 29 мА. Более низкие показания относятся к деталям с тонким слоем цементации или плохо закаленным, а выше 29 мА – к деталям с большой глубиной цементированного слоя и твердой сердцевиной.

В качестве примера контроля больших глубин упрочненных слоев могут служить валки холодной прокатки. Глубина активного закаленного слоя должна быть не меньше 3 % радиуса вала, который изменяется от 65 до 450 мм. Максимальная глубина закаленного слоя составляет 10 ... 15 мм, поэтому геометрические размеры электромагнита подбираются такими ($a = 35$ мм, $b = 55$ мм, $t = 95$ мм), чтобы можно было определять среднюю коэрцитивную силу на глубине 15 ... 20 мм. В отличие от малых глубин упрочненного

слоя переходная зона в валках холодной прокатки велика, и с увеличением диаметра вала наблюдается ее рост. Связь показаний коэрцитиметра с глубиной активного закаленного слоя линейная.

Исследования, проведенные с одно- и двуслойными изделиями, позволили выявить ряд закономерностей. С увеличением толщины однородного по структуре ферромагнетика сила размагничивающего тока I_{pc} , измеряемого в приставной магнитной цепи, убывает до определенного значения толщины $h = h_m$. Дальнейшее увеличение толщины однородного по структуре изделия ($h > h_m$) не влияет на показания коэрцитиметра. Величина $h = h_m$ названа минимальной толщиной промагничивания однородного по структуре массивного тела, а I_{pc}^* – размагничивающим током однородного по структуре массивного изделия с толщиной $h \geq h_m$. Исследования, выполненные с помощью восьми различных электромагнитов (табл. 15.2) на дисках с $h_m = 1$... 38,5 мм из стали 30ХГСА диаметром 134 мм при $H_c = 33$ А/см, позволили установить, что значение h_m зависит от площади сечения по-

15.2. Геометрические параметры приставных элетромагнитов и значения индукции B_3

Номер	a , мм	b , мм	t , мм	S_3 , мм ²	b/a	t/a	B_3 , Тл
1	4	10	15	40	2,5	3,75	1,5
2	5	15	25	75	3,0	5,0	1,71
3	12	10,5	33,5	126	0,875	2,8	1,72
4	4	28	41	112	7,0	10,25	1,71
5	18	18	28	324	1,0	1,56	1,77
6	9	38	41	324	4,2	4,55	1,77
7	12	28	32	336	2,3	2,7	1,86
8	8	18	25	114	1,25	3,12	–

люса электромагнита S_3 :

$$h_m = 2\sqrt{S_3} \quad (15.2)$$

Для электромагнитов 5–7 с разными параметрами a , b и t , но с примерно равной площадью сечения S_3 значения h_m одинаковы.

Таким образом, при $h > h_m$ магнитные свойства сердцевины изделия не должны влиять на показания коэрцитиметра. Проверка этого положения, проведенная на двуслойном составном ферромагнитном образце, подтверждает, что при $h = h_m$ показания коэрцитиметра близки к значениям I_{pc}^* для закаленной части изделия и практически не зависят от магнитомягкой сердцевины. По экспериментальным данным, полученным на поверхностно закаленных массивных изделиях, построена в относительных единицах обобщенная кривая зависимости показаний для всех приставных электромагнитов, на которой выделены четыре участка (рис. 15.6).

Участок I – от 0 до h_n (h_n – начальная толщина поверхностного слоя, начиная с которой показания коэрцитиметра заметно увеличиваются с ростом значения h):

$$h_n = 0,03\sqrt{S_3} \quad (15.3)$$

Показания коэрцитиметра на этом участке практически постоянны и зависят главным

образом от коэрцитивной силы незакаленной сердцевины (на рис. 15.6 участок I дан в более крупном масштабе, чем остальные).

Участок II – от h_n до h_k (h_k – предельная контролируемая толщина закаленного слоя):

$$h_k \approx 0,6\sqrt{S_3} \quad (15.4)$$

Показания коэрцитиметра здесь зависят от коэрцитивной силы и толщины закаленного слоя, а также от коэрцитивной силы сердцевины.

Участок III – от h_k до h_m :

$$h_m \approx 2\sqrt{S_3} \quad (15.5)$$

Показания коэрцитиметра на этом участке определяются главным образом коэрцитивной силой закаленного слоя и слабо зависят от изменения его толщины и свойств сердцевины.

Участок IV:

$$h > h_m \quad (15.6)$$

На этом участке показания коэрцитиметра зависят только от коэрцитивной силы закаленного слоя.

Обобщенная кривая на рис. 15.6 носит оценочный характер. При ее использовании следует учитывать причины, влияющие на разброс показаний коэрци-

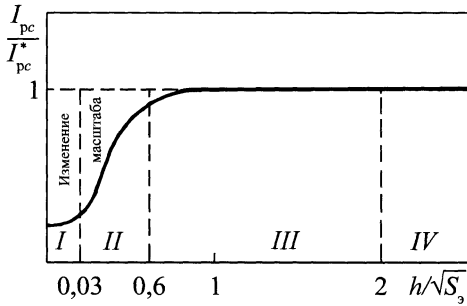


Рис. 15.6. Обобщенная кривая показаний коэрцитиметра в относительных единицах

тиметра. Рассмотрим два случая: одно и то же изделие испытывается разными электромагнитами и один и тот же электромагнит используется для испытаний разных изделий. В первом случае разброс показаний коэрцитиметра может быть обусловлен значением индукции B_z в полюсе электромагнита, размерами полюса (площадью сечения и отношением сторон) и расстоянием между полюсами. В свою очередь, разные значения B_z могут быть связаны с конструкцией электромагнита (размерами сердечника и намагничивающих катушек), намагничивающими ампер-витками и случайными воздушными зазорами между сердечниками электромагнитов и изделием. Во втором случае разброс показаний коэрцитиметра может быть обусловлен разными значениями коэрцитивных сил соответственно закаленных слоев и основ. Можно ожидать, что обобщенная кривая зависимости показаний коэрцитиметра от толщины закаленного слоя будет представлять собой не линию, а полосу. Эта полоса может быть более узкой, если в электромагнитах всех коэрцитиметров поддерживать индукцию в полюсе $B_z \approx 1,8$ Тл.

Анализ обобщенной кривой позволяет сделать вывод, что основной характеристикой электромагнита при контроле массивных изделий является площадь сечения полюса. Параметры электромагнита, соответствующие участку I кривой, следует выбирать, когда контролю подвергают

мягкую сердцевину изделия и пренебрегают свойствами тонкого поверхностного слоя, например при обезуглероживании. Условия, соответствующие участку II, используются при контроле поверхностного закаленного слоя, когда его толщина изменяется в известных пределах: от h_n до h_k . Параметры электромагнита, соответствующие участку IV, используют для контроля свойств однородных массивных изделий (например, физико-механических свойств упрочненного слоя), так как в этом случае на измерения не влияет их толщина. Описанные закономерности справедливы для поверхностно упрочненных слоев стальных и чугуновых изделий, полученных путем термической и химико-термической обработки и других упрочняющих воздействий, характеризующихся различием магнитных свойств сердцевины и упрочненного слоя.

По существующим методикам контроля глубины и твердости упрочненного слоя, как правило, измеряют один параметр. Однако по одному измеренному магнитному параметру трудно судить о толщине закаленного слоя и его твердости, особенно в случаях, когда исходная структура изделий перед закалкой изменяется. Еще более сложной задачей контроля является случай цементации, когда изменяются глубина слоя и степень насыщенности его углеродом, а различные условия термической обработки могут привести к вариациям структурного состояния цементированного слоя и сердцевины. Для повышения достоверности контроля необходимо увеличить число измеряемых параметров, учитывающих влияние изменений всех технологических процессов термической обработки изделий.

В наиболее простом случае поверхностного упрочнения – закалки с помощью ТВЧ – задачу контроля можно решить следующим образом. Исходя из универсальной кривой, приведенной на рис. 15.6, можно подобрать электромагни-

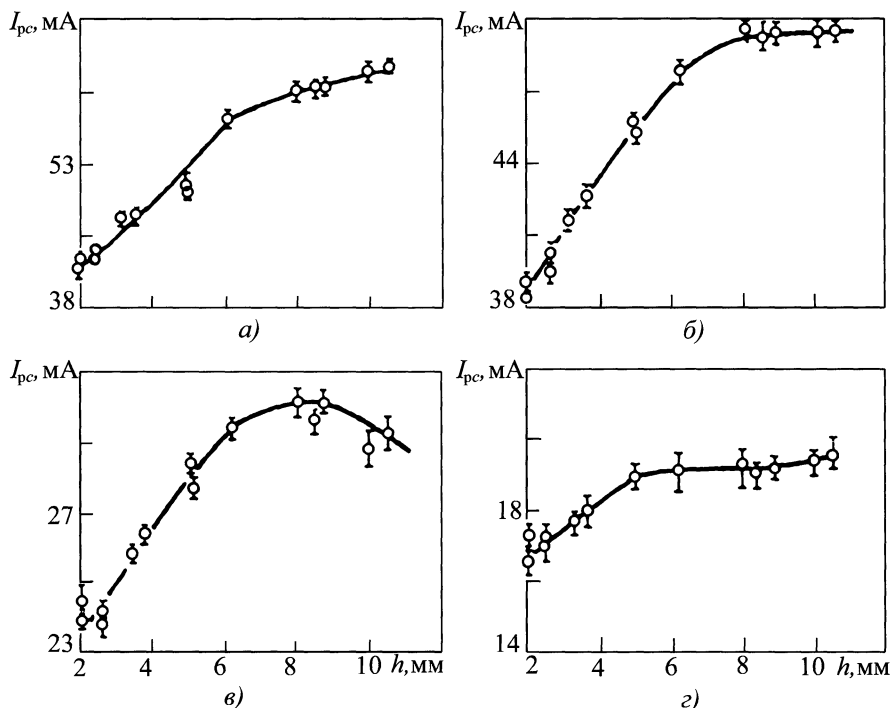


Рис. 15.7. Зависимость показаний коэрцитиметра от глубины закаленного слоя штоков бурового оборудования для электромагнитов 7 (а), 8 (б), 2 (в) и 1 (г)

ты, которые будут чувствительны только к структурному состоянию закаленного слоя или будут отражать усредненные магнитные свойства закаленного слоя и сердцевины изделия. Рис. 15.7 иллюстрирует возможность контроля толщины закаленного слоя штоков бурового оборудования, геометрические параметры которых даны в табл. 15.2. Как следует из рис. 15.7, приставной электромагнит 7 в соответствии с выражением (15.2) может быть использован для определения глубины закаленного слоя не более 9,5 мм, электромагнит 8 – до $h = 8$ мм, 2 – до 6 мм и 1 – до $h = 4,5$ мм.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные для изделий из стали 40Х, закаленных на разную глубину, хорошо согласуются с данными обобщенной кривой. Зависимость размагничивающего тока от толщины изделий в интервале $h_n \leq h \leq h_k$ близка к линейной, поэтому

эту часть кривой можно выразить аналитически, т.е. в данном случае коэрцитиметр будет выступать как толщиномер, и его шкалу можно непосредственно проградуировать в единицах толщины.

На показания коэрцитиметра кроме глубины закаленного слоя влияют магнитная жесткость самого слоя и исходная структура изделия до закалки. Влияние исходной структуры можно учесть, используя приставной электромагнит, который практически не чувствителен к структуре закаленного слоя, т.е. площадь сечения S_0 приставного электромагнита должна быть выбрана такой, чтобы соблюдалось условие (15.3). Однако простая оценка для толщин закаленного слоя 2,5 ... 3 мм показывает, что площадь сечения полюса должна быть очень большой, и этот способ учета влияния исходной структуры едва ли пригоден.

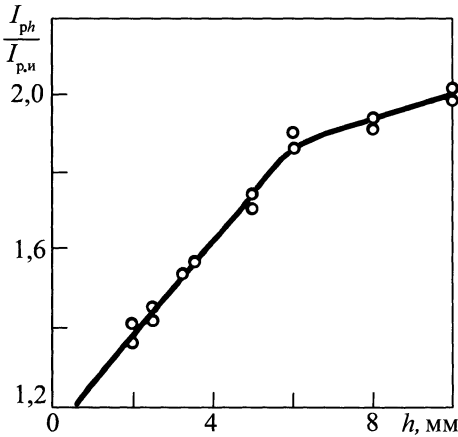


Рис. 15.8. Зависимость отношения $I_{ph}/I_{p,и}$ от глубины закаленного слоя h штоков бурового оборудования

Для учета влияния исходной структуры на результаты контроля обычно рекомендуется проверять изделия в несколько этапов. Сначала контролируют исходную структуру изделия перед закалкой ТВЧ и по результатам измерения подразделяют изделия на группы с близкими магнитными свойствами исходной структуры, а затем проводят термообработку и последующий контроль по группам. В ряде случаев на изделиях, которые подвергают местной закалке с помощью ТВЧ (есть нетермообработанные участки), можно одним приставным электромагнитом оценить магнитные свойства исходной структуры изделия перед закалкой и самого закаленного слоя. Если удастся оценить магнитные свойства исходной структуры (измерить силу размагничивающего тока коэрцитиметра), то ее влияние на результаты контроля учитывается графически (рис. 15.8) или аналитически:

$$h = AI_{ph}/I_{p,и} - C, \quad (15.7)$$

где I_{ph} и $I_{p,и}$ – размагничивающий ток коэрцитиметра при контроле соответственно поверхностно упрочненного изделия и исходной структуры на термически необработанном участке изделия; A и C – коэффициенты, зависящие от выбора преоб-

разователя, формы полюсных наконечников, геометрии изделия и определяемые эмпирически для каждого отдельного случая.

Контроль прочностных свойств упрочненного слоя можно осуществить при малой глубине проникновения магнитного потока в изделие. Это достигается при использовании приставных электромагнитов, удовлетворяющих условию $h > 0,6\sqrt{S_3}$. Если толщина закаленного слоя больше некоторого предельного контролируемого значения h_k , то прочностные свойства закаленного слоя можно определить без учета его толщины, хотя исходная структура изделий перед закалкой будет по-прежнему влиять на результаты контроля. Отсюда следует, что определение прочностных свойств по одному магнитному параметру невозможно и требуется ввести второй, который позволит учесть влияние исходной структуры изделия. Если толщина закаленного слоя меньше предельного контролируемого значения, то задача становится еще более сложной и необходимо вводить третью характеристику, учитывающую толщину закаленного слоя. Решение подобной задачи возможно лишь при использовании двух и более приставных электромагнитов, имеющих разные геометрические размеры.

При наличии трех измеренных параметров предложена формула для определения твердости поверхностно упрочненного изделия:

$$\text{HRC} = a_0 + a_1 I_{p,m} - a_2 I_{ph}^2 / I_{p,и} + a_3 I_{p,и}, \quad (15.8)$$

где $I_{p,m}$ – размагничивающий ток коэрцитиметра, получаемый при контроле закаленной части изделия приставным электромагнитом с малой площадью сечения полюса; a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты (например, при контроле штоков бурового оборудования, выпускаемых Уральским заводом тяжелого машиностроения, коэффициенты, просчитанные на ЭВМ на основании измерений магнитных и механи-

ческих свойств изделий, которые прошли поверхностную закалку и последующий отпуск при 150 ... 180 °С, имели следующие значения: $a_0 = 42,5$; $a_1 = 1,2$; $a_2 = 0,10$; $a_3 = 0,16$).

Для контроля качества поверхностно упрочненных слоев деталей автопроизводства предложено использовать электромагниты с коаксиально расположенными полюсами и феррозондовым преобразователем, находящимся во внутреннем полюсе.

Козрцитиметры с П-образными приставными электромагнитами широко применяют при контроле глубины упрочненного слоя и твердости изделий, упрочняемых с помощью закалки ТВЧ, цементации и наклепом. Недостатком П-образных преобразователей является невозможность раздельного определения глубины и твердости упрочненного слоя одним электромагнитом. Использование двух или более приставных электромагнитов приводит к снижению производительности контроля. Для устранения этого недостатка предлагается приставной электромагнит к коэрцитиметру, который снабжен вторым идентичным магнитопроводом, размещенным внутри первого. Значение силы тока размагничивания при нулевом сигнале феррозондового внутреннего преобразователя несет информацию о свойствах поверхностного слоя, а значение силы тока размагничивания при нулевом сигнале феррозондового внешнего преобразователя – о свойствах поверхностного слоя и сердцевины изделия.

Когда упрочненная зона имеет небольшие размеры, ее контроль с помощью приставных электромагнитов затруднен. Для локального контроля небольших упрочненных зон предлагается использовать метод точечного полюса. В этом случае намагничивается лишь небольшой участок изделия, а получаемый остаточный магнитный момент, который считывается различного типа преобразователями, пропорционален значению коэрцитивной силы. Для локального намагничивания ши-

рокое распространение получило несколько схем: с помощью постоянных магнитов (см. рис. 14.5, а), с применением малогабаритных соленоидов (см. рис. 14.5, б) или соленоидов с сердечниками. Для считывания значения остаточного магнитного момента намагниченного участка изделия чаще всего используют феррозондовые преобразователи (см. рис. 14.5, б, в), включенные по схеме градиентометра. Метод локального намагничивания и последующего измерения остаточного магнитного момента был опробован при контроле глубины закаленных и цементированных слоев.

При контроле качества поверхностно упрочненных изделий различие магнитных свойств упрочненного слоя и сердцевины изделия не всегда настолько значительно, чтобы реализовать магнитный метод контроля. Одним из путей устранения этих недостатков магнитного метода является воздействие на намагниченное изделие частично размагничивающих постоянных и переменных магнитных полей. Ввиду разной устойчивости магнитных состояний поверхностно упрочненного слоя и сердцевины к воздействиям таких полей можно увеличить различие магнитных характеристик и таким образом расширить функциональные возможности и достоверность магнитного метода контроля.

Кривые изменения коэрцитивной силы H_c^{\sim} и тока I_0^{\sim} в зависимости от напряженности размагничивающего поля H_p^{\sim} и от отношения толщины закаленного слоя к толщине образца представлены на рис. 15.9 и 15.10 для тороидов и приставной магнитной цепи. Коэрцитивная сила двуслойного ферромагнетика является полем, при котором магнитные потоки не равны нулю (что характерно для однородного материала), а равны по значению и противоположны по направлению в каждом из слоев. Она в полном смысле не является физической характеристикой, а

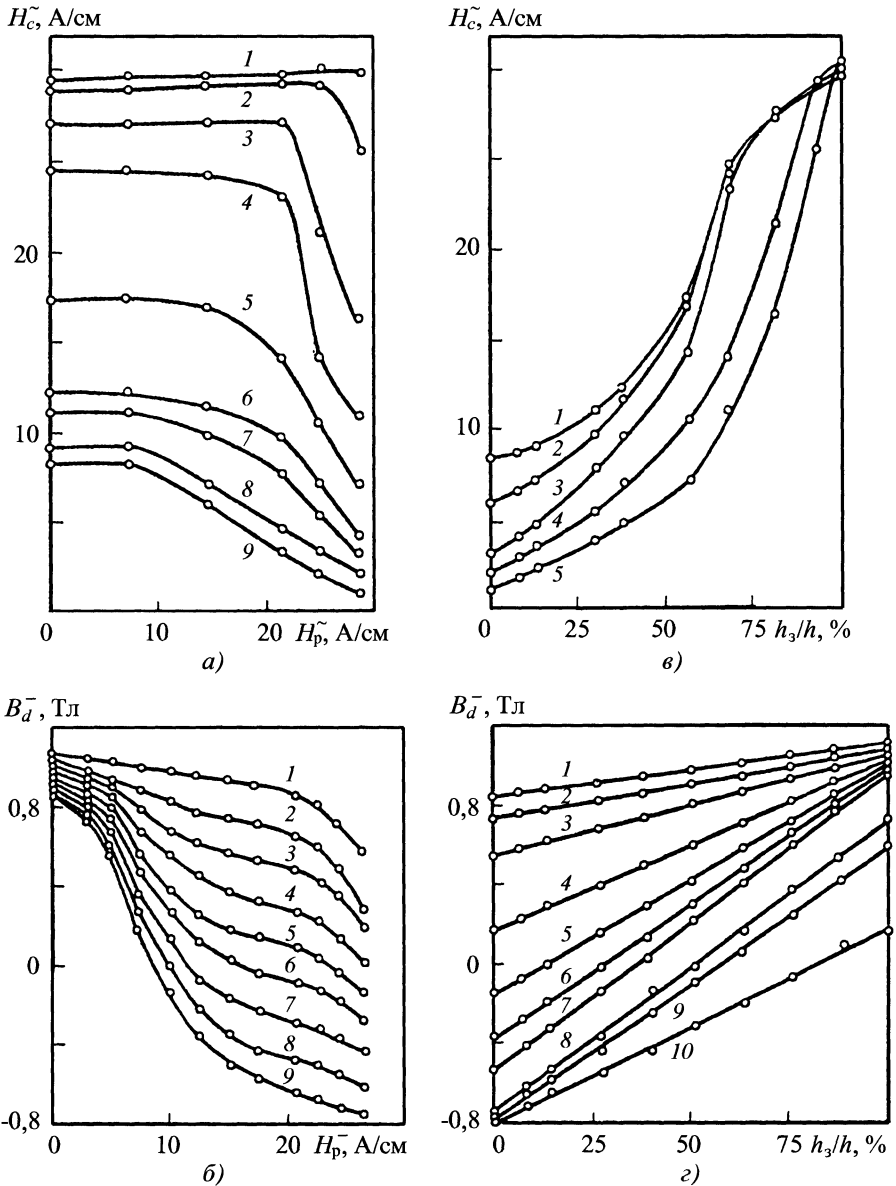


Рис. 15.9. Зависимости, полученные для тороидальных образцов:

a, б – $H_c^- (H_p^-)$ и $B_d^- (H_p^-)$: 1 – однородный закаленный образец; 2 – образец с $h_3 = 7$ мм и $h_3/h = 87,5$ %; 3 – 6 мм и 75 %; 4 – 5 мм и 62,5 %; 5 – 4 мм и 50 %; 6 – 3 мм и 37,5 %; 7 – 2,2 мм и 27,5 %; 8 – 1,1 мм и 13,75 %; 9 – однородный нетермообработанный образец;

в – $H_c^- (h_3/h)$: 1 – $H_p^- = 0$; 2 – 14,2; 3 – 21,3; 4 – 24,9; 5 – $H_p^- = 28,4$ А/см; *г* – $B_d^- (h_3/h)$: 1 – $H_p^- = 0$; 2 – 3,6; 3 – 7,1; 4 – 10,7; 5 – 14,2; 6 – 17,7; 7 – 21,3; 8 – 35,5; 9 – 39,0; 10 – $H_p^- = 42,6$ А/м

определяется помимо коэрцитивных сил составляющих слоев соотношением сечений, взаимным расположением и формой петли гистерезиса этих слоев. При намагничивании ферромагнетика вдоль слоев коэрцитивная сила не подчиняется закону аддитивности, поэтому возможен лишь приближенный численный расчет ее значения с использованием аппроксимаций петель гистерезиса каждого слоя.

Коэрцитивная сила по предельным петлям гистерезиса на тороидах существенно различается для сырой и закаленной сталей ($H_{cc} = 8$ А/см и $H_{c3} = 29$ А/см соответственно). Однако, когда толщина закаленного слоя составляет от толщины всего образца до 10 % или, наоборот, когда он занимает 80 ... 100 %, коэрцитивная сила слабо изменяется при вариациях толщины закаленного слоя (см. рис. 15.9, в, кривая 1). При наложении переменного поля на двуслойный ферромагнетик в состоянии остаточной намагниченности коэрцитивность мягкого материала существенно уменьшается, начиная с небольших амплитуд $H_p^- \approx H_{cc}$, для жесткого материала – при $H_p^- > H_{c3}$.

В связи с этим при увеличении H_p^- от коэрцитивной силы мягкого материала до коэрцитивной силы жесткого материала чувствительность H_c^- к изменениям толщины жесткого слоя возрастает. При дальнейшем увеличении H_p^- чувствительность опять снижается. Изменяя амплитуду H_p^- , можно получить необходимую для контроля зависимость $H_c^- (h_3/h)$ для разных диапазонов изменения h_3 . Это справедливо как для тороидов (см. рис. 15.9, в), так и для пластин (см. рис. 15.10, в). Результаты измерений, представленные на рис. 15.10, а, в, получены с помощью приставной магнитной цепи, поэтому этот тип преобразователя без большой доработки

можно использовать при создании средств контроля поверхностно упрочненных и обезуглероженных изделий. Кривая 4 на рис. 15.10, г иллюстрирует максимальную чувствительность в диапазоне $h_3/h = 0 \dots 30$ %, кривая 5 – 40 ... 100 %, кривая 6 показывает более низкую чувствительность, однако она линейна в пределах $h_3/h = 15 \dots 100$ %.

При значениях $H_p^- > H_{c3}$ магнитные состояния как мягкой, так и жесткой компоненты стремятся к размагниченому. Поэтому более широкие возможности для повышения чувствительности данного метода открываются при измерении B_d^- – остаточной индукции, полученной методом размагничивания изделия постоянным полем H_p^- из состояния остаточной намагниченности. Рис. 15.9, б иллюстрирует устойчивость состояния остаточной индукции тороидальных образцов к действию постоянного поля. Верхняя и нижняя кривые, ограничивающие семейство приведенных кривых, соответствует магнитомягкому и магнитожесткому слоям. Остаточная индукция последнего уменьшается до нуля при значении H_p^- , близком к его коэрцитивной силе, при этом для жесткого слоя B_d^- практически не изменяется. На рис. 15.9 видно, что если разность остаточных индукций B_r составляет 0,2 Тл, то после размагничивания постоянным полем $H_p^- = 21$ А/см эта разность достигает 1,5 Тл.

Для приставной магнитной цепи при действии поля $H_p^- = 0,5(H_{cc} + H_{c3})$ (рис. 15.10, б) также наблюдается увеличение чувствительности, однако в этом случае $B_{d1}^- - B_{d2}^- = 1,0$ Тл, т.е. разность несколько меньше, чем для тороидальных образцов.

На рис. 15.9, г, и 15.10, г показано изменение величины B_d^- при увеличении

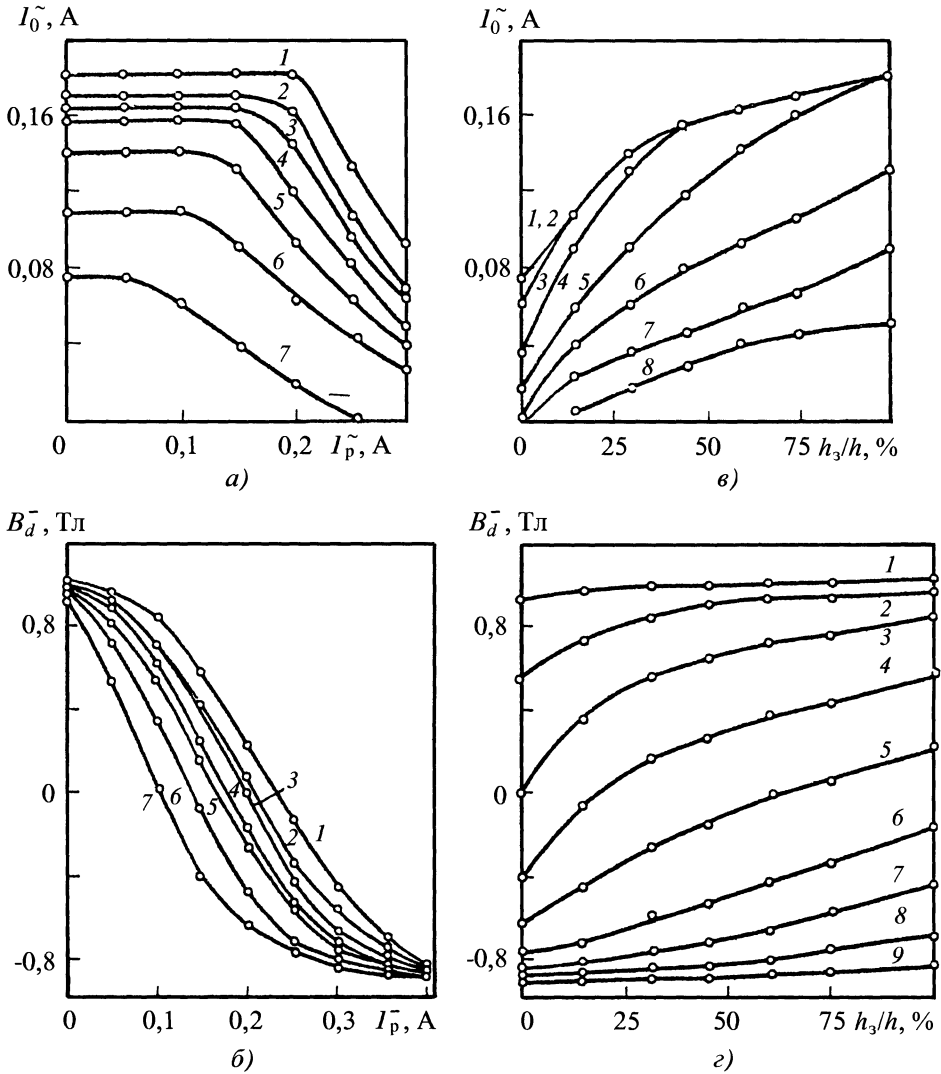


Рис. 15.10. Зависимости, полученные для приставной магнитной цепи:

а, б – $I_0(I_p^-)$ и $B_d(I_p^-)$: 1 – однородный закаленный образец; 2 – образец с $h_3 = 15$ мм и $h_3/h = 75\%$; 3 – 12 мм и 60%; 4 – 9 мм и 45%; 5 – 6 мм и 30%; 6 – 3 мм и 15%; 7 – однородный нетермообработанный образец; *в, г* – $I_0(h_3/h)$ и $B_d(h_3/h)$: 1 – $I_p^- = 0$; 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,15; 5 – 0,20; 6 – 0,25; 7 – 0,30; 8 – $I_p^- = 0,35$ А; 9 – однородный нетермообработанный образец

отношения h_3/h . Для тороидальных образцов – это линейные зависимости, имеющие разную крутизну. Для приставной магнитной цепи наибольшая чувствительность наблюдается при изменении этого отношения до 25 %, хотя, как и для пере-

менных размагничивающих полей, путем выбора H_p^- можно добиться оптимальной, в частности линейной, зависимости $B_d(h_3/h)$ на любом участке изменения толщины закаленного слоя (см. рис. 15.10, г).

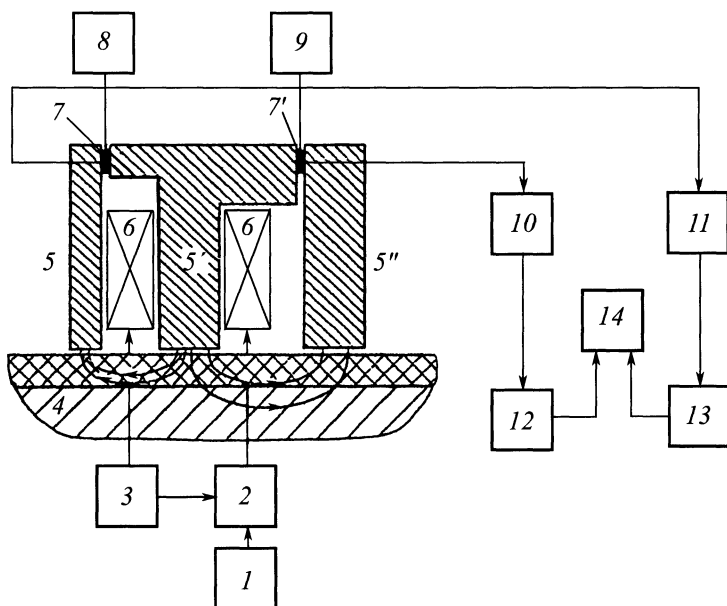


Рис. 15.11. Структурная схема прибора КПУ-1

При сравнении результатов воздействия переменных и постоянных размагничивающих полей видно, что характер получающихся закономерностей аналогичен. Однако относительные изменения характеристик, а следовательно, и их чувствительность к изменению толщины закаленного слоя несколько больше при размагничивании контролируемых изделий постоянным полем.

Измерения, проведенные на штоках буровых машин из стали 40X, поверхностно закаленных с помощью ТВЧ и отпущенных при 180 °С, подтвердили, что, выбирая значение размагничивающего поля H_p^- , можно получить однозначную связь $B_d^-(h_3/h)$, причем чувствительность B_d^- к вариациям глубины закаленного слоя является вполне достаточной для реализации магнитного метода контроля.

Исследования по частичному размагничиванию остаточно-намагниченных из-

делий постоянным полем позволили сконструировать прибор для отдельного контроля глубины и твердости поверхностно упрочненных изделий (рис. 15.11). Принцип работы прибора основан на измерении остаточной магнитной индукции после цикла намагничивание–размагничивание в замкнутой магнитной цепи. Для получения двух параметров контроля при одном измерении используется Ш-образный накладной преобразователь, у которого стержни ярма 5, 5' и 5'' имеют разную площадь сечения. На среднем стержне 5' электромагнита размещена катушка 6. Одна часть магнитного потока, создаваемого этой катушкой, замыкается через поверхностно упрочненный слой изделия 1 стержнями 5 и 5' и измеряется преобразователем Холла (ПХ) 7, расположенным в зазоре ярма, другая замыкается через участок изделия, включающий как закаленный слой, так и неупрочненную область, и измеряется преобразователем Холла 7'.

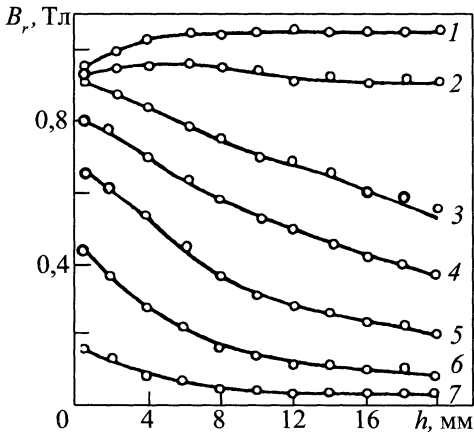


Рис. 15.12. Зависимости остаточной индукции B_r частных циклов магнитного гистерезиса от глубины закаленного слоя при максимальном токе намагничивания в приставной магнитной цепи $I_{max} = 1,5$ (1), 0,5 (2), 0,3 (3), 0,25 (4), 0,2 (5), 0,15 (6), 0,1 (7)

Состояние остаточной намагниченности достигается по окончании цикла намагничивание–размагничивание от блоков намагничивания 3 и размагничивания 2, аналогичных соответствующим блокам в приборе РК-2. Длительность двуполярных импульсов намагничивания равна четырем-пяти полупериодам сетевого напряжения при амплитуде тока ≥ 5 А. Импульсы размагничивающего тока поочередно подаются в катушку 6 от двух идентичных блоков размагничивания 2, причем амплитуду этих токов с помощью блока 1 можно независимо ступенчато устанавливать переключателями на передней панели прибора через 20 мА до 400 мА. Стабилизатор тока 8 ПХ 7, измерительный усилитель 11, масштабный усилитель 13 образуют схему магнитометра, измеряющего магнитное поле в зазоре стержня преобразователем 7, а стабилизатор тока 9 ПХ 7', измерительный усилитель 10, масштабный усилитель 12 образуют схему магнитометра, измеряющего магнитное поле в зазоре стержня преобразователем 7'. Схема магнитометра идентична схеме магнитометра прибора РК-3.

В приборе с помощью аналогового блока деления 14 вычисляется отношение измеренного значения остаточной индукции в магнитной цепи ПХ 7' к значению остаточной индукции в цепи ПХ 7. Оно зависит только от глубины упрочненного слоя. К выходу магнитометра на преобразователе Холла 7 подключен блок компараторов, который световыми транспарантами указывает годность контролируемых изделий.

При контроле поверхностно упрочненных массивных стальных изделий чаще всего контролируемые участки намагничивают до высоких значений индукции. Выше было показано, что в термически обработанных сталях процессы перемагничивания в слабых (область Релея) и сильных магнитных полях протекают по-разному. Результаты исследований закономерностей изменения остаточной индукции частных циклов от глубины закаленного слоя с помощью приставной магнитной цепи (рис. 15.12) свидетельствуют о существовании различия в характере кривых $B_r(h)$ в сильных (кривые 1, 2) и относительно слабых (кривые 3–7) магнитных полях. Для зависимостей $B_r(h)$, измеренных на частных циклах магнитного гистерезиса в слабых магнитных полях, характерна большая чувствительность к толщине упрочненного слоя, особенно для толщин до 8 мм (кривые 5, 6). Намагничивание изделий на частных циклах существенно снижает энергоемкость первичных преобразователей.

Описанные выше методы позволяют определять глубину и твердость поверхностных слоев, однако свойства неупрочненной сердцевины изделия также имеют важное значение для качества упрочненных изделий, особенно когда перед поверхностным упрочнением изделие подвергают объемной термической закалке и отпуску. Проблему одновременного определения свойств как поверхностного слоя, так и сердцевины изделия можно в некоторых случаях решить путем использова-

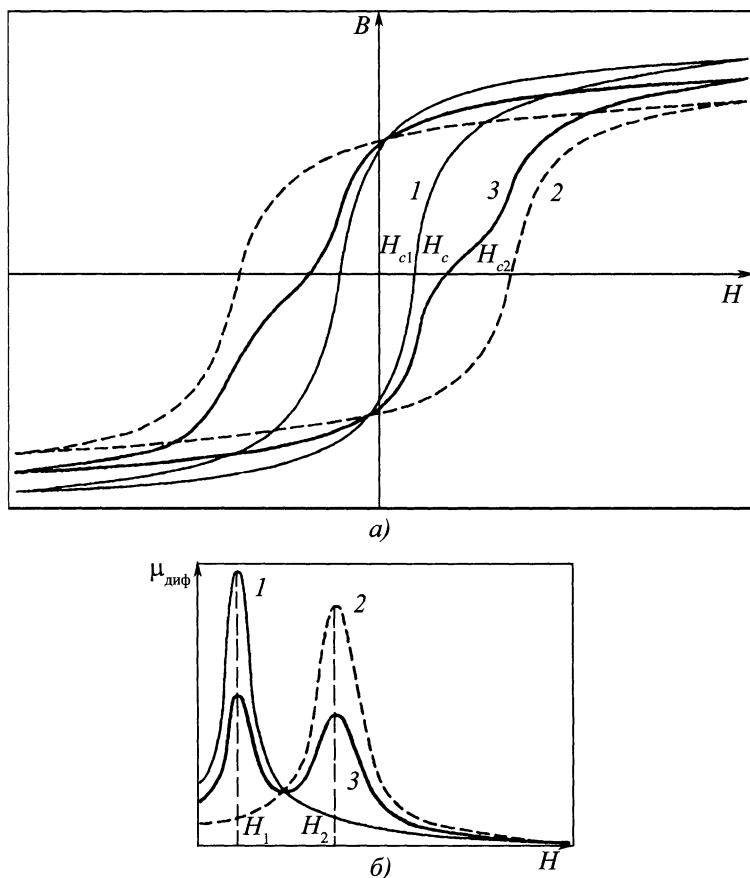


Рис. 15.13. Петли магнитного гистерезиса (а) и кривые дифференциальной проницаемости (б) однородных тороидов (1, 2) и двуслойного тороида (3)

ния особенностей перемангничивания двуслойного ферромагнетика.

Петля гистерезиса двуслойного ферромагнетика имеет искаженный вид. На рис. 15.13, а показаны петли гистерезиса двух однородных материалов (кривые 1, 2) и двуслойного образца, состоящего из этих материалов (кривая 3). Поскольку образцы представляли собой тороиды, имеющие одинаковые размеры, и перемангничивание происходит вдоль плоскости раздела слоев, кривую 3 можно получить путем аддитивного сложения двух первых с учетом площади сечения каждого из слоев:

$$B(H) = \frac{S_1}{S} B_1(H) + \frac{S_2}{S} B_2(H), \quad (15.9)$$

где B_1, B_2 – значения индукции в первом и втором слоях; B – средняя по сечению индукция двуслойного образца; S, S_1, S_2 – площади поперечного сечения двуслойного образца, первого и второго слоев.

Петли гистерезиса, рассчитанные по формуле (15.9) и определенные экспериментально, практически совпадают. Перегибы петли гистерезиса (см. рис. 15.13, а, кривая 3), свидетельствуя о наличии второго слоя, отличающегося от основной массы материала, не характеризуют коли-

чественно ни его глубину, ни его свойства. Более информативной в этом смысле является зависимость дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$ от напряженности перемещающего поля H . Перегибы петли гистерезиса на рис. 15.13, *a* проявляются в виде двух максимумов на зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$. Первый максимум наблюдается в поле H_1 , второй – в поле H_2 . Аналогичные максимумы наблюдали при исследовании скачков Баркгаузена в двуслойном ферромагнетике. При выполнении равенства (15.9) для дифференциальной проницаемости можно соответственно записать

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{S_1}{S} \mu_{\text{диф}1} + \frac{S_2}{S} \mu_{\text{диф}2}, \quad (15.10)$$

где $\mu_{\text{диф}}$ – средняя по сечению дифференциальная проницаемость двуслойного образца; $\mu_{\text{диф}1}$, $\mu_{\text{диф}2}$ – дифференциальные проницаемости первого и второго материалов, составляющих образец.

Наиболее простым способом получения зависимостей $\mu_{\text{диф}}(H)$ и определения полей H_1 и H_2 является измерение ЭДС катушки, охватывающей образец при перемещении его линейно изменяющимся током. При этом

$$\begin{aligned} e &= -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \frac{d\Phi}{dt} \frac{dH}{dt} = \\ &= -\omega \frac{dH}{dt} \left(\frac{d\Phi_1}{dH} + \frac{d\Phi_2}{dH} \right) = \\ &= -\omega \frac{dH}{dt} (S_1 \mu_{\text{диф}1} + S_2 \mu_{\text{диф}2}), \end{aligned} \quad (15.11)$$

где Φ , Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки в двуслойном образце и в каждом из слоев соответственно.

Поскольку $dH/dt = \text{const}$, то можно записать:

$$e = k(S_1 \mu_{\text{диф}1} + S_2 \mu_{\text{диф}2}).$$

Если слои однородны по своему сечению, то

$$\mu_{\text{диф}} = h_1 \mu_{\text{диф}1} + h_2 \mu_{\text{диф}2}, \quad (15.12)$$

где h_1 и h_2 – относительные толщины каждого из слоев.

Как правило, проницаемость магнитоупрочненного слоя мала в поле, при котором проницаемость магнитомягкого слоя достигает своего максимума, и наоборот, т.е. дифференциальная магнитная проницаемость в поле $H_{\mu_{\text{диф}1\text{max}}}$ определяется произведением $h_1 \mu_{\text{диф}1}$, а в поле $H_{\mu_{\text{диф}2\text{max}}} = h_2 \mu_{\text{диф}2}$. Поле максимальной дифференциальной проницаемости образца практически совпадает со значением его коэрцитивной силы. Определяя H_1 и H_2 двуслойного образца, можно получить информацию о значении коэрцитивной силы и физико-механических свойствах того и другого слоев, а по известным закономерностям $\mu_{\text{диф}2\text{max}}(H)$ определить толщину этих слоев.

Выше говорилось о двуслойном ферромагнетике, хотя на практике поверхностно упрочненное изделие между упрочненным слоем и сердцевиной всегда имеет переходную зону с плавно изменяющимися от поверхности к глубине свойствами. Исследования на образцах, вырезанных из поверхностно закаленных ТВЧ деталей, показали, что присутствие переходной зоны существенно не изменяет характера кривой $\mu_{\text{диф}}(H)$.

Использование описанного выше метода ограничено тем, что изделие должно перемещаться вдоль линии раздела слоев, т.е. перемещающее поле должно быть параллельно расположению слоев. Реальные намагничивающие устройства (пермеаметры, соленоиды, приставные магнитные устройства) не обеспечивают строгого выполнения этих условий, поскольку при намагничивании ими в изделии присутствует нормальная к поверхности раздела слоев составляющая магнитного потока и равенство (15.10) не выполняется.

Определение полей $H_{\mu_{\text{диф}}\text{max}}$ непосредственно из зависимостей типа $\mu_{\text{диф}}(H)$ требует наблюдения этих зависимостей. Для практического использования эти методы мало приемлемы ввиду длительности и низкой точности измерений. Разработан

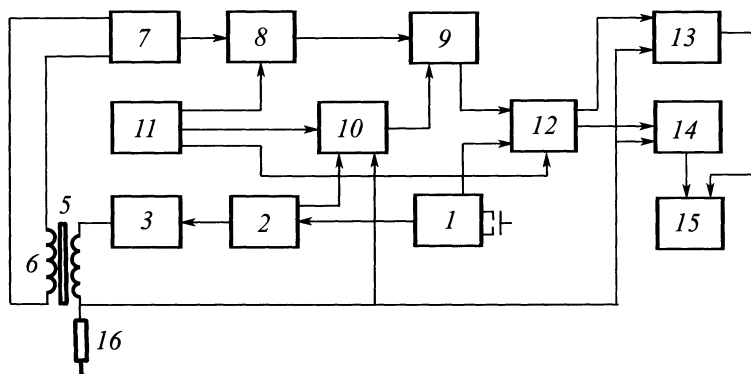


Рис. 15.14. Функциональная схема прибора МИКС

прибор, который позволяет определять абсолютные значения напряженности полей, соответствующих максимумам значений дифференциальной магнитной проницаемости, с выводом результатов на стрелочный или цифровой индикатор (рис. 15.14). Временная диаграмма работы прибора показана на рис. 15.15.

Принцип работы прибора заключается в следующем. После нажатия кнопки "Пуск" 1 напряжение треугольной формы, сформированное генератором напряжения 2, поступает на вход управляемого источника тока 3. В нагрузке, представляющей собой намагничивающую обмотку 4 образца 5, протекает ток треугольной формы амплитудой ± 2 А (см. рис. 15.15, а). Создаваемое магнитное поле перемагничивает образец по предельной петле гистерезиса. В измерительной обмотке 6 индуцируется сигнал, пропорциональный $\mu_{\text{диф}}$ (см. рис. 15.15, б). Этот сигнал поступает на вход дифференциального усилителя 7. Дифференциальная схема включения выбрана для подавления синфазной помехи сети.

С выхода усилителя сигнал поступает на вход электронного дифференциатора 8. Схема дифференциатора свободна от основных недостатков классических схем: устойчива к возбуждению, сохраняет работоспособность в широком диапазоне постоянных времени. На выходе дифференциатора сигнал представляет собой

производную $d\mu_{\text{диф}}/dH$ (см. рис. 15.15, в), нулевые значения которой соответствуют точкам перегиба функции $\mu_{\text{диф}}(H)$, т.е. ее максимумам и минимумам. Этот сигнал поступает на детектор нуля 9, который представляет собой стробируемый компаратор. Сигналы стробирования поступают со схемы стробирования 10, управляемой тремя различными сигналами.

Первый сигнал поступает со схемы формирователя управляющих импульсов дифференциатора 11 и осуществляет непрерывное стробирование компаратора на время переходных процессов, происходящих в дифференциаторе, что позволяет повысить помехоустойчивость схемы и уменьшить вероятность ложных срабатываний. Второй сигнал поступает с RC-триггера и разрешает работу компаратора при поступлении импульса перемагничивания после семи подготовительных циклов перемагничивания. Третий сигнал стробирования разрешает работу компаратора в определенном диапазоне (от I_1 до I_2) линейно нарастающего тока от $-I_{\text{max}}$ до $+I_{\text{max}}$ (см. рис. 15.15, з). Значения I_1 и I_2 могут независимо регулироваться. При наличии разрешающих уровней трех сигналов стробирования одновременно детектор нуля формирует импульс (см. рис. 15.15, д) в момент перехода через нуль функции $d\mu_{\text{диф}}/dt$ от ее положительного значения.

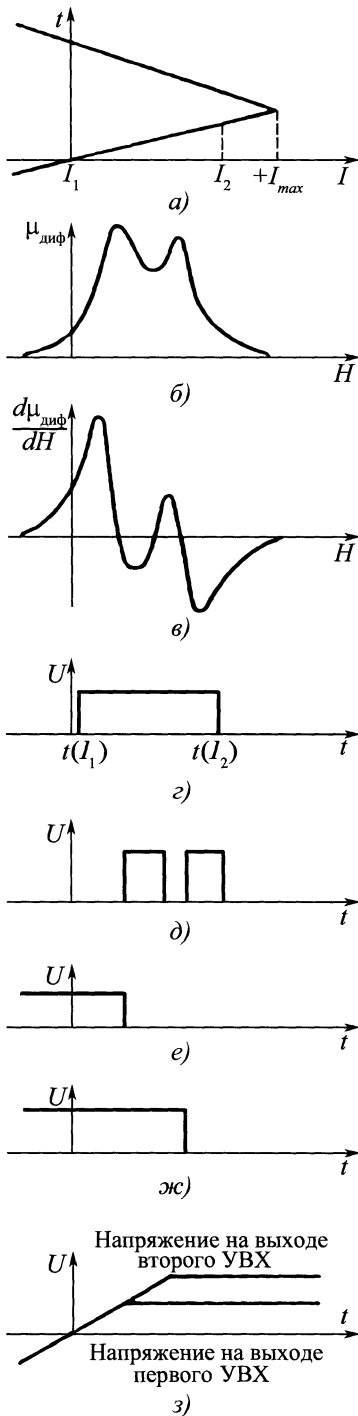


Рис. 15.15. Временная диаграмма работы прибора МИКС

С компаратора сигнал поступает на схему формирователя сигналов управления 12 устройства выборки и хранения (УВХ). Эта схема состоит из сдвигового регистра и схемы формирования импульсов. На входы УВХ 13, 14 с измерительного резистора 16 поступает напряжение, пропорциональное протекающему в намагничивающей обмотке току. До поступления на УВХ импульсов со схемы формирователя оба УВХ находятся в режиме выборки. После поступления первого импульса (см. рис. 15.15, e) первое УВХ переходит в режим хранения и запоминает значение силы тока, соответствующее второму максимуму функции $\mu_{\text{диф}}(H)$. Зафиксированные значения (см. рис. 15.15, з) могут быть выведены на стрелочные или цифровые индикаторы 15. Подбирая масштабный коэффициент на выходе УВХ, можно получать результаты непосредственно в единицах напряженности магнитного поля, т.е. значения коэрцитивных сил слоев двуслойного изделия.

Для случаев, когда изделие имеет слишком тонкий по отношению ко всему сечению изделия упрочненный слой или когда поля максимальной дифференциальной проницаемости для поверхностного слоя и основы близки и на полевой зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ нет четкого разрешения двух пиков, предложен сравнительный способ контроля толщины и свойств слоев. При данном способе магнитным полем линейно изменяющегося тока переманичивается не только испытываемое поверхностно упрочненное изделие, но и в идентичных условиях изделие тех же размеров, не подвергнутое поверхностному упрочнению. Дифференциальные магнитные проницаемости того и другого изделия определяют путем измерения ЭДС $e_1(H)$ и $e_2(H)$ охватывающих их катушек. Значение отношения первой e_{1r} и второй e_{2r} ЭДС при напряжениях полей, равных нулю, позволяет оценивать толщину упрочненного слоя. По напряженности поля,

соответствующей максимальному значению $e_2(H)$, судят о свойствах основы изделия, а по напряженности поля, соответствующей максимальному значению разностной функции

$$\Delta e_{\max}(H) = e_1(H) - \frac{e_{1r}}{e_{2r}} e_2(H) \quad (15.13)$$

оценивают качество поверхностного слоя.

Таким образом, магнитные методы контроля можно широко использовать для

оценки качества поверхностно упрочненных различными способами изделий. С учетом особенностей перемангничивания двуслойных ферромагнетиков, а также различий в устойчивости магнитных состояний упрочненного и неупрочненного слоев удастся значительно расширить функциональные возможности магнитных методов контроля и создать приборы для отдельного определения физико-механических характеристик каждого из слоев и их толщин.

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА

В практике магнитного структурного анализа также широкое распространение получили магнитные структурно-нечувствительные характеристики при качественном и количественном определении фазового состава сталей и сплавов, при оценке изменений, происходящих в фазовом составе в результате различных термических или деформационных воздействий, при исследованиях кинетики фазовых превращений, а также при определении концентрации магнитной фазы в неферромагнитных материалах, объема пор и неферромагнитных включений в ферромагнитной матрице. Использование методов магнитного фазового анализа иногда является предпочтительным, поскольку они обладают высокой точностью, достаточной экспрессностью, бесконтактным съемом информации и в ряде случаев позволяют получить более достоверные сведения о фазовых превращениях. Например, в деформированных железоникелевых сплавах вследствие дилатометрической аномалии магнитные методы имеют преимущество перед дилатометрическими.

16.1. МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ФАЗОВОМ МАГНИТНОМ АНАЛИЗЕ

Для фазового магнитного анализа можно использовать магнитные характеристики, значения которых определяются физическими свойствами фаз независимо от их структурного состояния. К числу таких магнитных параметров относят константы естественной кристаллографической анизотропии (K), температуру Кюри (T_c) и намагниченность насыщения (M_s). Информацию об изменениях фазового состава можно получить при проведении

термомагнитного анализа из сравнения зависимостей $K = f(T)$ и $M_s = f(T)$. Для фазового экспресс-анализа относительно тонких поверхностных слоев или изделий, имеющих одинаковый состав фаз на поверхности и в сечении, можно применять метод термоЭДС. Возможность использования термоЭДС для фазового анализа подтверждается тем, что для многих марок сталей изменения намагниченности и термоЭДС при вариациях температуры закалки и отпуска имеют эквидистантный характер.

Для получения достоверной информации при фазовом анализе необходимо знать, как влияют на выбранные физические параметры форма выделений, степень дисперсности и напряженное состояние исследуемой фазы. Теоретические и экспериментальные данные показывают, что упругие деформации, форма выделений и степень дисперсности неферромагнитной фазы при правильном выборе намагничивающего поля слабо влияют на значения намагниченности насыщения и температуры Кюри. Так, для железа и никеля при комнатной температуре изменение намагниченности насыщения под действием напряжений составляет 0,1 ... 2 А/(МПа × см), а положение точки Кюри изменяется на 10^{-3} ... 10^{-2} °/МПа. Существенные изменения M_s и T_c при наличии напряжений будут свидетельствовать о переходе ферромагнетика из области упругой деформации в область пластической.

Для неферромагнитных сплавов в качестве параметра магнитного фазового анализа используют парамагнитную восприимчивость. Если известны значения парамагнитной восприимчивости исходных фаз, то можно определить состав двухфазного сплава, поскольку парамагнитная восприимчивость является линейной функцией его состава.

Для качественного магнитного анализа многофазных систем применяют магнитометаллографический метод, сущность которого заключается в следующем. Ферромагнитная фаза, находящаяся в парамагнитной матрице, имеет магнитные поля рассеяния, вызванные появлением магнитных зарядов на границах раздела фаз. При нанесении на тщательно отполированную поверхность металла магнитной суспензии, которая применяется для наблюдения доменной структуры, магнитные частички, находящиеся в суспензии во взвешенном состоянии, под действием пондеромоторных сил смещаются и оседают в местах, соответствующих наибольшему градиенту магнитного поля, отмечая тем самым расположение ферромагнитных фаз в парамагнитной матрице. Первоначально этот метод был предложен для обнаружения α -фазы в аустенитных сталях, а затем был использован для регистрации остаточного аустенита в инструментальных сталях. Магнитометаллографический метод целесообразно применять (в сочетании с другими методами) для определения остаточного аустенита в многофазных сплавах.

16.2. МЕТОДЫ ФАЗОВОГО МАГНИТНОГО АНАЛИЗА

При проведении фазового анализа используют разные методы; каждый основан на измерении конкретного физического параметра (иногда набора физических параметров). Чаще всего применяют три типа измерительных схем: баллистические, пондеромоторные, магнитометрические. Для решения задач физического металловедения, связанных, например, с исследованием распада переохлажденного аустенита, больше подходят пондеромоторные и магнитометрические методы, которые позволяют проследить кинетику распада переохлажденного аустенита как в изотермических условиях, так и при охлаждении с разными скоростями.

Для количественного определения фазового состава сталей (например, остаточного аустенита), с большой долей ферромагнитной составляющей можно использовать *баллистический метод*. Остановимся на двух наиболее распространенных схемах измерения намагниченности насыщения баллистическим методом.

Намагниченность насыщения с помощью баллистического гальванометра можно измерить, коммутируя намагничивающий ток в электромагните, между полюсами которого расположен образец. Этот метод измерения M_s используют редко, поскольку необходим баллистический гальванометр с большим периодом свободных колебаний, а при расчете значения M_s необходимо учитывать значения напряженности внутреннего поля в образце и магнитного потока в воздушном зазоре между поверхностью образца и измерительной катушкой.

Для повышения точности измерения за счет исключения влияния зазора при неполном прилегании измерительной катушки к образцу или изделию используют *дифференциальные* схемы измерения намагниченности насыщения. Два образца – стандартный 1 и исследуемый 2 закрепляются между полюсами электромагнита (рис. 16.1). Измерительные обмотки $w_{\text{изм}}$ этих образцов включаются встречно. Намагниченность насыщения определяют по формуле

$$M_{sx} = \left(M_{s\text{ст}} \pm \frac{C_6 \Delta\alpha}{2\mu_0 w S_{\text{ст}}} \right) \frac{S_{\text{ст}}}{S_x} + \frac{(H_{\text{ст}} - H_x) S_k}{S_x}, \quad (16.1)$$

где $\Delta\alpha$ – показания гальванометра; C_6 – постоянная баллистического гальванометра; w – число витков в измерительных обмотках стандартного и исследуемого образцов; $S_{\text{ст}}$, S_x и S_k – площади сечения стандартного и исследуемого образцов и измерительных катушек соответственно; $H_{\text{ст}}$ и H_x – напряженности внутренних маг-

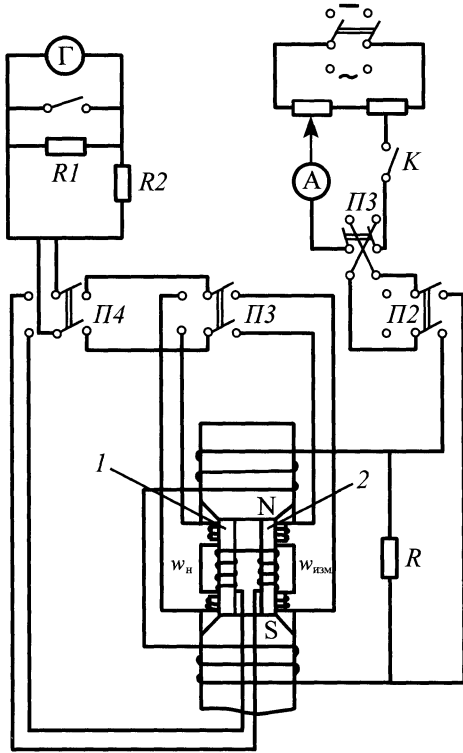


Рис. 16.1. Схема установки для измерения намагниченности насыщения дифференциальным методом

нитных полей стандартного и исследуемого образцов.

Значения $H_{ст}$ и H_x измеряют с помощью накладных катушек поля. Когда в плоскости, перпендикулярной к оси полюсов электромагнита, поле достаточно однородное и внутренние поля исследуемого и стандартного образцов различаются незначительно, то слагаемым $(H_{ст} - H_x)S_K/S_x$ можно пренебречь, и при условии $S_{ст} = S_x$ формула (16.1) примет упрощенный вид:

$$M_{sx} = M_{ст} \pm \frac{C_6 \Delta \alpha}{2\mu_0 w S_x}. \quad (16.2)$$

Следует отметить, что для реализации рассмотренного метода также требуется баллистический гальванометр с большим периодом свободных колебаний; кроме того, длина образцов должна быть строго одинаковой.

Другим распространенным методом измерения намагниченности насыщения является *метод Штеблейна*, в соответствии с которым магнитный поток измеряют при удалении исследуемого образца из межполюсного пространства через канал, просверленный в полюсах электромагнита. Чаще всего используют дифференциальную схему измерения. Стандартный 1 и исследуемый 2 образцы (рис. 16.2) закрепляют встык в неферромагнитном держателе, который перемещают при измерении в канал электромагнита. Между полюсами электромагнита размещают две измерительные катушки, намотанные на одном каркасе с одинаковым произведением wS , но разным числом витков ($w_1 \neq w_2$). Катушки включают так, чтобы индуцируемые в них токи были противоположны по направлению. Подобная конструкция позволяет уменьшить влияние колебаний тока в цепи электромагнита на результаты измерений. При достаточно большой разности витков ($w_1 - w_2$) можно проводить исследования, связанные с небольшими изменениями намагниченности, например в области парапроцесса.

Разность намагниченностей насыщения стандартного и испытуемого образцов определяется по отклонению указателя гальванометра при перемещении их в зазоре электромагнита. Намагниченность насыщения вычисляют по формуле

$$M_{sx} = \left(M_{ст} \pm \frac{C_6 \Delta \alpha}{\mu_0 (w_1 - w_2) S_{ст}} \right) \frac{S_{ст}}{S_x}. \quad (16.3)$$

Знак минус в формулах (16.1) – (16.3) используется при расчетах в тех случаях, когда намагниченность насыщения стандартного образца больше намагниченности исследуемого образца.

Намагниченность насыщения стандартного образца определяется абсолютным методом при перемещении его одного

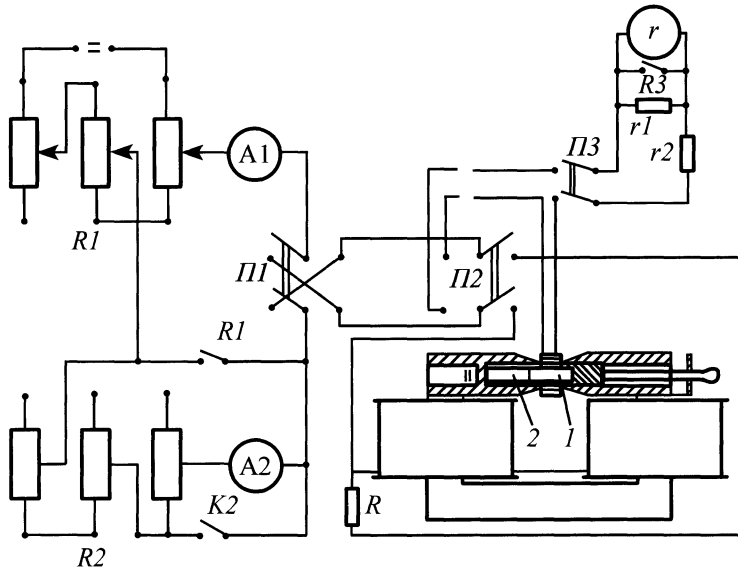


Рис. 16.2. Схема установки для измерения намагниченности насыщения по методу Штеблея

в поле электромагнита и вычисляется как

$$M_{sx} = \frac{C_6 \Delta\alpha}{\mu_0(w_1 - w_2) S_{CT}} \quad (16.4)$$

Данный метод измерения намагниченности достаточно прост, в нем исключена необходимость использования гальванометра с большим периодом свободных колебаний, поскольку время измерения определяется не параметрами электромагнита, а скоростью перемещения стандартного и испытуемого образцов в измерительной катушке.

При проведении фазового магнитного анализа необходимо, чтобы приложенное магнитное поле было достаточным для достижения состояния намагниченности насыщения всех ферромагнитных фаз в исследуемом образце. Величина внутреннего магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности насыщения, зависит от коэффициента размагничивания образца, внутреннего коэффициента размагничивания отдельных фаз и структурных составляющих стали:

$$H_i = H_e - N_{\text{эф}} M, \quad (16.5)$$

где H_e – внешнее магнитное поле; $N_{\text{эф}} = N_{\text{O}} + N_{\text{в}} + N_{\text{н}}$ – эффективный коэффициент размагничивания образцов (N_{O} , $N_{\text{в}}$, $N_{\text{н}}$ – коэффициенты размагничивания, обусловленные соответственно геометрией образца, наличием выделений и других возмущений, приводящих к неоднородности распределения спонтанной намагниченности); M – намагниченность, соответствующая данному полю.

В ряде случаев необходимо экстраполировать значение намагниченности в области высоких магнитных полей на бесконечно большую напряженность магнитного поля и только по этим значениям уже определять намагниченность насыщения. Экстраполяцию, как правило, выполняют на основе формулы Фрелиха–Кенели

$$\frac{H}{M} = \frac{a}{M_s} + \frac{1}{M_s} H \quad (16.6)$$

или формулы Вейса

$$M = M_s (1 - a/H), \quad (16.7)$$

где a – некоторая постоянная данного материала.

При достаточно больших значениях напряженности магнитного поля кривую намагничивания можно выразить аналитически (закон приближения к насыщению):

$$M = M_s (1 - a_1/H - a_2/H^2) + M_p, \quad (16.8)$$

где a_1 , a_2 – коэффициенты, определяемые пластическими деформациями ферромагнетика, энергиями кристаллографической анизотропии и упругих напряжений; M_p – намагниченность парапроцесса. Наличие в малых объемах ферромагнетика резко неоднородных напряжений, а также неферромагнитных и слабоферромагнитных включений может привести к заметному отклонению намагниченности от насыщения. Исследования на спеченных сталях позволили установить, что чувствительность коэффициентов a_1 и a_2 к пористости примерно на порядок выше, чем к содержанию углерода, т.е. выполнение закона приближения к насыщению может служить физической основой для разработки метода контроля пористых спеченных изделий.

Определение намагниченности насыщения путем экстраполяции на бесконечно большую напряженность магнитного поля сопряжено с определенными трудностями, поэтому часто экстраполяцией пренебрегают, что может привести к существенной погрешности при определении значения M_s и соответственно к неправильной трактовке полученных результатов. Результаты экспериментальных исследований, выполненных на углеродистых (0,64 и 1,2 % С) и легированных сталях с применением сильных магнитных полей $7,2 \cdot 10^3$ А/см показывают, что намагниченность, измеренная в полях напряженностью 1200 ... 3200 А/см, для образцов с $T_{\text{отп}} = 300 \dots 700$ °С отличается на 3 % от намагниченности насыщения, определенной путем экстраполяции на бесконечно большую напряженность магнитного поля.

При проведении фазового анализа необходимо прикладывать поле, достаточное для достижения намагниченности насыщения всех фаз, присутствующих в сплаве. В противном случае намагниченность будет зависеть от магнитной предыстории образца, величины внутренних напряжений, распределения фаз в матрице, формы и размеров их составляющих, степени магнитного взаимодействия фаз между собой; намагниченность не будет являться однозначной функцией фазового состава, как при воздействии полей, достаточных для достижения насыщения. Все изложенные замечания по выбору намагничивающего поля при количественном фазовом магнитном анализе следует учитывать при конструировании соответствующей аппаратуры.

16.3. КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СТАЛЕЙ

Температура Кюри – одна из важных магнитных характеристик, зависящих от химического и фазового составов ферромагнитных материалов. Переход от магнитного порядка к магнитному беспорядку при температуре Кюри не сопровождается ни химическими изменениями, ни изменениями в кристаллической структуре вещества и относится к фазовым переходам II рода. Наличие в сплавах двух и более ферромагнитных фаз может быть зарегистрировано путем измерения температуры Кюри каждой из них. Такой метод определения числа ферромагнитных фаз в сталях и сплавах нашел широкое применение.

Для получения полной информации о числе ферромагнитных фаз и об их объемном соотношении чаще всего используют *магнитограммы* – зависимость намагниченности насыщения от температуры. Простейшими являются магнитограммы одно- и двухфазных сплавов, содержащих ферромагнитную и неферромагнитную фазы. Стали, содержащие две ферромагнитные фазы, имеют две точки Кюри, ха-

рактически характеризующие каждую из фаз, а намагниченность стали определяется суммой намагниченностей каждой из фаз. На рис. 16.3 приведена магнитограмма двухфазного ферромагнетика. Анализируя кривые $M_s(T)$, можно установить число ферромагнитных фаз в сплаве, температуру Кюри каждой из них и, если имеется достаточно сведений о магнитных свойствах отдельных фаз, количество каждой фазы в стали или сплаве (рис. 16.4).

Зная удельные намагниченности $J_s = M_s/v$ и $\sigma_s = M_s/m$, можно определить плотность магнитных фаз, входящих в состав стали (сплава), без их выделения:

$$\rho = J_s/\sigma_s = m/v. \quad (16.9)$$

Физической предпосылкой проведения количественного фазового магнитного анализа по намагниченности насыщения является выполнение закона аддитивности M_s для гетерогенных систем. С учетом объемной доли каждой фазы и ее намагниченности, закон аддитивности намагниченности насыщения можно выразить следующим образом:

$$M_s = \sum_i \frac{P_i}{100\%} M_{si}, \quad (16.10)$$

где P_i – объемная доля i -й фазы, %; M_{si} – намагниченность насыщения i -й фазы; при этом

$$\sum P_i = 100\%. \quad (16.11)$$

В ферромагнитных сталях помимо ферромагнитных фаз могут присутствовать диа- и парамагнитные фазы. Однако в практических расчетах намагниченность этих фаз не учитывается, поскольку их вклад очень мал. Для расчета объема неферромагнитной фазы в сталях используют выражения (16.10) и (16.11).

Закон аддитивности неоднократно проверялся исследователями на различных многофазных ферромагнитных системах. Он оказался справедливым как при комнатной температуре, так и при температурах, отличных от комнатной, только в последнем случае следует учитывать характер из-

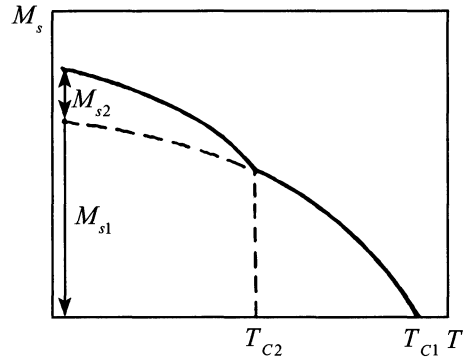


Рис. 16.3. Магнитограмма двухфазного ферромагнетика

менения намагниченности насыщения каждой фазы от температуры.

Фазовый магнитный анализ широко применяют при определении количества остаточного аустенита в сталях. Метод измерения количества остаточного аустенита является относительным, так как намагниченность насыщения исследуемого образца сравнивается с намагниченностью насыщения стандартного образца. Выбор стандартного образца играет важную роль в точности определения количества остаточного аустенита магнитными методами. Наиболее простой является система, содержащая только одну парамагнитную фазу. Примером такой системы может служить широкий класс закаленных углеродистых сталей и некоторые легирован-

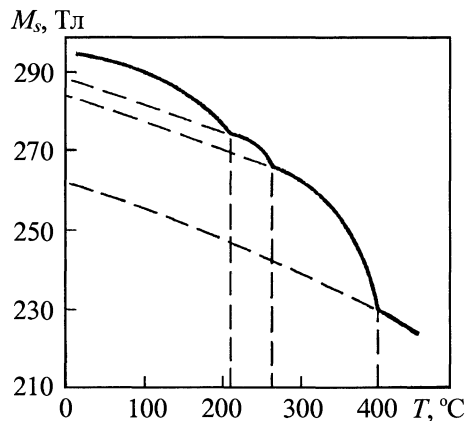


Рис. 16.4. Магнитограмма стали Y12

ные стали, в которых при нагреве под закалку практически все карбиды растворяются. Для сталей такого типа в качестве стандартного образца желателен использовать образец с полностью (100 %) мартенситной структурой.

Согласно выражениям (16.10) и (16.11), для этого случая можно записать

$$M_s = \frac{P_m}{100\%} M_{SM}; \quad (16.12)$$

$$P_m + P_a = 100\%, \quad (16.13)$$

где M_s и M_{SM} – намагниченность насыщения исследуемого закаленного образца и его мартенситной фазы; P_m , P_a – объемные доли мартенсита и остаточного аустенита в образце, %. Из формул (16.12) и (16.13) следует:

$$P_a = 100\% - P_m = 100\% - \frac{M_s}{M_{SM}} 100\% = \left(1 - \frac{M_s}{M_{SM}}\right) 100\%. \quad (16.14)$$

При вычислении процентного количества остаточного аустенита сравнивают намагниченности насыщения исследуемого образца, содержащего мартенсит и остаточный аустенит, и образца со 100 %-ной мартенситной структурой. Однако образец со 100 %-ной мартенситной структурой получить практически невозможно. Поэтому приходится подбирать стандартный образец, который по своему структурному состоянию и химическому составу идентичен образцу со 100 %-ной мартенситной структурой, т.е. $M_{SM} = M_{ст}$. Точность определения количества остаточного аустенита в этом случае зависит от того, насколько близок к 100 %-ной мартенситной структуре стандартный образец. Для этих целей используют обработку холодом, но даже при таком виде обработки в средне- и высокоуглеродистых сталях сохраняется до 6 % остаточного аустенита. В тех случаях, когда количество остаточного аустенита в исследуемой стали мало, погрешность его оп-

ределения при использовании данного стандартного образца будет велика и при расчетах можно получить отрицательное значение.

Для низкоуглеродистых и слаболегированных сталей в качестве материала для стандартного образца можно использовать армко-железо с намагниченностью $(M_{сф})_{ст}$, так как небольшое различие в содержании углерода и легирующих элементов в стандартном и исследуемом образцах мало сказывается на намагниченности насыщения сталей этого класса. Для высокоуглеродистых и высоколегированных сталей подобный стандартный образец обычно не применяется, потому что углерод, хром, марганец, кремний, ванадий при растворении в α -Fe значительно снижают его намагниченность насыщения. В этом случае нельзя предположить, что $(M_{сф})_{ст} = M_{SM}$. Таким образом, при выборе материалов, для которых допустимо приближение $(M_{сф})_{ст} = M_{SM}$ при вычислении количества остаточного аустенита, можно использовать формулу

$$P_a = \left(1 - \frac{M_s}{(M_{сф})_{ст}}\right) 100\%. \quad (16.15)$$

Для определения количества остаточного аустенита в низкоуглеродистых и малолегированных конструкционных сталях в качестве стандартного можно использовать образец из исследуемой стали со структурой феррита отжига и с намагниченностью насыщения $(M_{сф})_{ст}$. В высоколегированных сталях с карбидообразующими элементами, легко растворяющимися в цементите (Mn, Cr) или образующими специальные карбиды (V, W, Ti и др.), мартенсит закалки и феррит отжига будут отличаться не только по концентрации углерода, но и по концентрации легирующих элементов, вследствие чего различие в значениях намагниченности этих фаз может быть довольно значительным.

Приближение $(M_{sc})_{ст} = M_{sm}$ будет более точным, если брать ферритный стандартный образец, содержащий то же количество легирующих элементов, что и мартенсит закалки испытуемого образца. При одинаковом содержании легирующих элементов на намагниченность испытуемого образца влияет различие концентрации углерода в них, при этом чем ниже содержание углерода в испытуемой стали, тем выше точность определения количества остаточного аустенита. Значение намагниченности насыщения ферритного стандартного образца, легированного одним элементом, можно рассчитать на основании существующих литературных данных о влиянии этого элемента на намагниченность насыщения ферритной фазы.

В практике фазового магнитного анализа для исключения влияния остаточного аустенита стандартных образцов используют образцы той же марки стали, закаленные на структуру мартенсита и отпущенные при высокой температуре. Однако в результате образования карбидов при отпуске намагниченность насыщения стандартного образца будет снижаться, поэтому точность определения количества остаточного аустенита в исследуемой стали будет зависеть от объема карбидной фазы и ее намагниченности в стандартном образце.

При выборе стандартного образца для систем с двумя и большим числом парамагнитных фаз возникают еще большие трудности. В высокоуглеродистых и высоколегированных инструментальных сталях после закалки, кроме мартенсита и остаточного аустенита, присутствуют карбиды – в зависимости от степени легирования либо ферромагнитные, либо парамагнитные. При определении количества остаточного аустенита следует учитывать объем карбидной фазы и намагниченность насыщения карбидов, если карбидная фаза ферромагнитная. Если карбиды парамагнитные, то намагниченность насыщения закаленного образца будет определяться

выражением (16.12), а соотношение объемных долей фаз – выражением

$$P_a + P_m + P_k = 100 \%, \quad (16.16)$$

где P_k – объемная доля всех парамагнитных карбидов, %.

Аналогично уравнению (16.14) запишем

$$P_a + P_k = 100 \% - P_m = \frac{(M_{sm})_{ст} - M_s}{(M_{sm})_{ст}} 100 \%. \quad (16.17)$$

Определить количество остаточного аустенита только магнитными методами невозможно. Для расчета остаточного аустенита с помощью формулы (16.17) необходимо использовать стандартный образец со 100 %-ной мартенситной структурой и найти объем карбидной фазы в стандартном образце другими методами. Точность определения аустенита в стали в значительной степени обусловлена точностью метода карбидного анализа. Обычно расчет аустенита в стали проводят методом последовательных приближений. Поскольку намагниченность насыщения стандартного образца зависит от содержания в твердом растворе углерода и легирующих элементов, при определении аустенита в сталях этого класса необходимо соблюдать следующие условия:

1. Стандартный и исследуемый образцы должны иметь одинаковое количество карбидов и одинаковую концентрацию углерода и легирующих элементов в твердом растворе. Для снижения количества остаточного аустенита в стандартном образце его подвергают обработке холодом. Это допустимо для сталей с высокой температурой начала мартенситного превращения, когда обработка холодом обеспечивает почти полное превращение аустенита. Кроме того, стандартный и исследуемый образцы должны иметь полную прокаливаемость.

2. Если условие 1 не может быть выполнено, то учитывают снижение намагниченности насыщения в зависимости от содержания углерода и легирующих эле-

ментов в стали в соответствии с имеющимися литературными данными о влиянии углерода, вольфрама, хрома, кремния и других легирующих элементов на намагниченность насыщения. Количество карбидов определяют с помощью карбидного анализа.

Кратко рассмотрев методы определения намагниченности насыщения систем с двумя парамагнитными фазами, видим, что задача эта непростая, но она еще более усложняется, если помимо парамагнитных карбидов в стали присутствуют и ферромагнитные карбиды. При достаточной идентичности ферромагнитных фаз и в предположении, что содержание карбидной фазы в стандартном и исследуемом образцах одинаковое, вычисление количества остаточного аустенита в сталях можно осуществлять по приближенной формуле, степень приближения которой будет в основном определяться различием объема карбидных фаз стандартного и исследуемого образцов:

$$P_a = \frac{M_{\text{ст}} - M_{\text{сх}}}{M_{\text{ст}}} (100\% - P_{\text{к.ст}}), \quad (16.18)$$

где $P_{\text{к.ст}}$ – объемная доля карбидной фазы в стандартном образце, %.

16.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Рассмотренные методы измерения намагниченности насыщения и способы определения количества остаточного аустенита используют в основном в лабораторных условиях. Для решения промышленных задач неразрушающего определения количества остаточного аустенита в деталях применяют приборы и установки другого типа.

Наиболее широкое распространение для целей промышленного контроля получил дифференциальный магнитный прибор (рис. 16.5). Намагничивающее устройство прибора представляет собой Н-об-

разное симметричное ярмо из трансформаторной стали. Намагничивающие обмотки w_1-w_4 обеих половин ярма включены последовательно-встречно, что позволяет создавать при намагничивании магнитный поток одного направления. Магнитное поле в таком намагничивающем устройстве достигает 400 А/см. Разность намагниченностей ΔM_s , испытуемой и стандартной деталей в первых конструкциях определяли по отклонению рамки с током, а в последующих с помощью феррозонда (ФЗ), вмонтированного в перемычку Н-образного ярма электромагнита.

При одинаковых геометрических размерах и структурном состоянии контролируемого изделия и стандартного образца, а также при абсолютной симметрии обеих половин ярма и отсутствии значительных различий в потоках рассеяния в местах соприкосновения изделий с полюсами электромагнита магнитные потоки Φ_x и $\Phi_{\text{ст}}$ должны быть одинаковыми, а показания прибора при этом равны нулю. Во всех остальных случаях отклонения в ту или иную сторону соответствуют большему или меньшему содержанию неферромагнитной фазы, например аустенита в испытуемом изделии по отношению к стандартному образцу. Например, при определении остаточного аустенита в стали ШХ15 в качестве стандартного берут изделие, подвергнутое закалке и последующей обработке холодом при -70°C .

Градуирование дифференциального прибора проводят обычно по изделиям, прошедшим разную термическую обработку и имеющим различное количество остаточного аустенита. Градуирование заключается в определении взаимосвязи между разницей в содержании остаточного аустенита в изделиях и показаниями дифференциального магнитного прибора. Такая методика определения количества остаточного аустенита в подшипниковой стали ШХ15 справедлива при условии, что содержание других фаз, например карбидов, незначительно изменяется от детали к

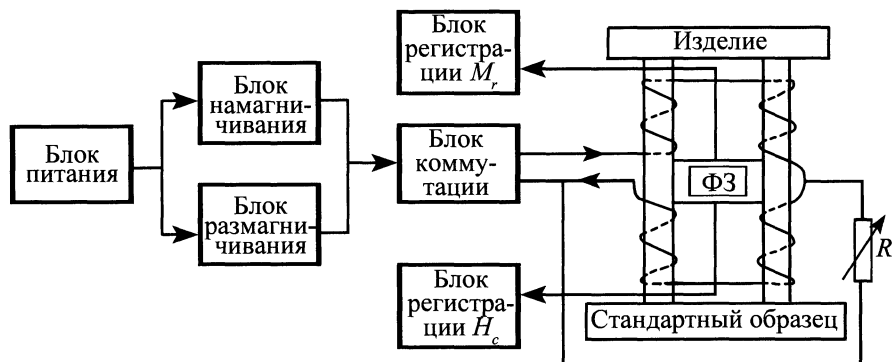


Рис. 16.5. Структурная схема магнитного прибора с приставным дифференциальным преобразователем для измерения индукции насыщения и коэрцитивной силы

детали, т.е. можно допустить, что присутствие карбидов вносит только систематическую погрешность при определении намагниченности насыщения.

Использование дифференциального магнитного прибора для определения в сталях небольших количеств остаточного аустенита требует более строгой аттестации стандартного образца (лучше применять другие методики определения количества остаточного аустенита в стандартном образце).

В качестве стандартного образца допускается использовать не саму деталь, а ее "магнитный эквивалент" (см. рис. 16.5). Чаще всего магнитный эквивалент подбирается из той же стали, что и контролируемое изделие. Выбор стандартного образца или магнитного эквивалента должен осуществляться в соответствии с требованиями, изложенными выше. Для более точного уравнивания магнитных потоков в обеих половинах электромагнита при подборе магнитного эквивалента в схему питания электромагнита введено переменное сопротивление R , шунтирующее обмотки w_3 и w_4 . При введении в схему прибора этого сопротивления и использовании магнитного эквивалента необходимо учитывать их возможное влияние на результаты определения абсолют-

ного количества остаточного аустенита в испытуемом изделии.

В приборах последних конструкций предусмотрено измерение индукции насыщения и коэрцитивной силы на закаленных изделиях из заэвтектоидных сталей позволяет судить не только о количестве остаточного аустенита в стали, но и о степени недогрева или перегрева при закалке. В дифференциальных измерителях магнитных характеристик типа ДИМХ предусмотрено измерение трех магнитных характеристик — B_s , B_r , H_c в полуавтоматическом режиме по заданной программе контроля. В приборе предусмотрено от одного до восьми циклов магнитной подготовки.

Для контроля мелких изделий измерение магнитных характеристик осуществляется в открытой дифференциальной магнитной цепи. Сравнение магнитных моментов M_s и M_r изделия и стандартного образца осуществляется с помощью феррозондов, включенных в режиме градиентометра (рис. 16.6). Цикл работы блока намагничивания прибора, начинающийся при нажатии кнопки "Пуск", состоит из пропуска через обмотки соленоидов преобразователя трех разнополярных им-

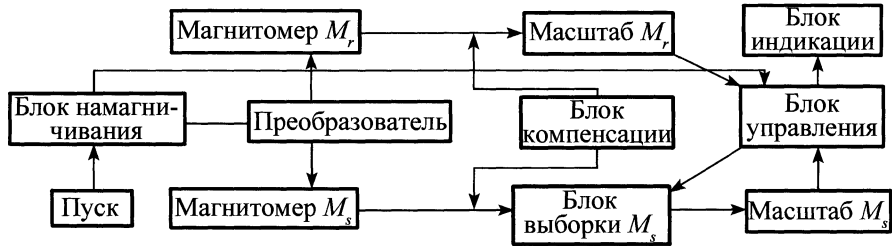


Рис. 16.6. Структурная схема прибора ДИХМ-2

пульсов тока: двух подготовительных, позволяющих отстроиться от влияния магнитной предыстории испытуемого изделия, и одного намагничивающего импульса. Формирование импульсов тока – полувольт сетевого тока частотой 50 Гц – обеспечивается работой тиристорного преобразователя. При длине соленоида 45 мм, внутреннем диаметре 25 мм и амплитуде импульса 20 А амплитуда намагничивающего поля в центре соленоида достигает 1,7 кА/см. Соленоид намотан проводом ПЭВ-2 диаметром 0,63 мм.

Измерительная часть прибора состоит из двух автокомпенсационных аналоговых магнитометров, настроенных для проведения измерений при наложении максимального намагничивающего поля (магнитометр M_s) и в отсутствие поля (магнитометр M_r), подключенных к соответствующим феррозондам. Измеренные значения последовательно подаются на блок индикации для считывания. В исходном состоянии сигнал с магнитометра M_r через масштабный усилитель подается для индикации на стрелочный прибор, расположенный на передней панели. После нажатия кнопки "Пуск" по команде с блока управления магнитометр M_s отключается от блока индикации, а на стрелочный прибор на время, необходимое для считывания показаний, поступает сигнал, пропорциональный разностному магнитному моменту изделий при максимальном намагничивающем поле. Для этого выход маг-

нитометра M_s на время прохождения измерительного импульса подключается к блоку выборки M_s , с выхода которого сигнал через масштабный усилитель поступает на блок индикации. Затем по команде с блока управления прибор возвращается в исходное состояние, к блоку индикации подключается выход магнитометра M_r , а информация из пикового детектора сбрасывается. Масштабные усилители позволяют регулировать уровни сигнала, подаваемого на стрелочный прибор, в пределах 40 дБ.

Для контроля крупногабаритных изделий разработан конденсационный магнитный структуроскоп, с помощью которого можно измерять параметры, пропорциональные индукции насыщения и коэрцитивной силе испытуемых изделий. Измерительная часть приставного магнитного устройства (ПМУ) состоит из катушки, намотанной на перемычке сплошного П-образного ярма, сигнал с которой после интегрирования пропорционален потоку в этой перемычке: $\Phi_y = B_y S_y$. С помощью этой же катушки определяется момент отсчета тока размагничивания, пропорционального коэрцитивной силе изделия. Значения измеряемых параметров стандартного изделия могут запоминаться в регистрирующей части прибора, что позволяет в дальнейшем при необходимости измерять лишь разностные значения магнитных характеристик, т.е. реализуется компенсационная схема измерений.

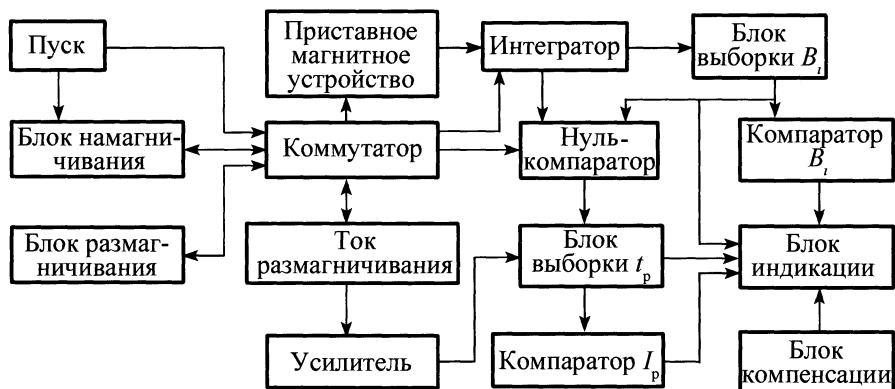


Рис. 16.7. Структурная схема магнитного структуроскопа для контроля крупногабаритных изделий

Для намагничивания и размагничивания изделий используется одна обмотка, состоящая из двух катушек, расположенных на стержнях П-образного ярма. Цикл работы блока намагничивания прибора (рис. 16.7) состоит из пропускания через намагничивающую обмотку после отжатия кнопки "Пуск" двух разнополярных импульсов тока намагничивания, а затем размагничивающего тока, линейно нарастающего до определенного значения, после чего он выключается. Для удобства дальнейшей работы с изделием в конце цикла предусмотрено его размагничивание серией двуполярных размагничивающих импульсов с экспоненциально уменьшающейся амплитудой. Подключение обмотки к блокам происходит автоматически под управлением коммутатора. Длительность цикла работы составляет 2 ... 3 с.

Параллельно с блоком намагничивания работает блок обработки сигнала. Напряжение с измерительной катушки через дифференциальный усилитель поступает на интегратор, включающийся сигналом с коммутатора при нажатии кнопки "Пуск" на время прохождения намагничивающих и размагничивающих импульсов. Поскольку контролируемое изделие может иметь остаточную намагничённость, то за нулевой поток в замкнутой магнитной

цепи ярмо-изделие принимается поток $\Phi_{я0}$. В общем случае измеряемая петля может быть несимметричной относительно оси wI (рис. 16.8). При прохождении максимальных значений тока намагничивания на выходе интегратора имеются напряжения U_s , значения которых пропорциональны значениям потоков $\Phi_{я\max+}$ и $\Phi_{я\max-}$, измеренных относительно $\Phi_{я0}$.

После суммирования значений U_s по абсолютному значению с помощью двуполярного пикового детектора получается

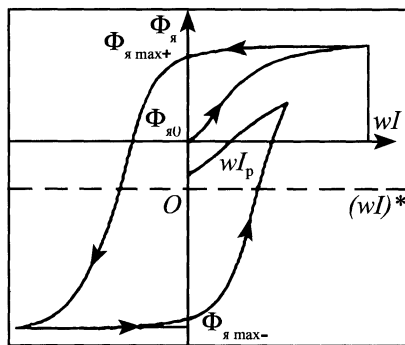


Рис. 16.8. Закономерность изменения магнитного потока в приставном магнитном устройстве при проведении цикла измерений

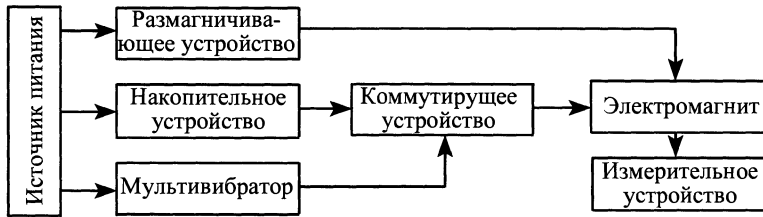


Рис. 16.9. Структурная схема аустенитометра

сигнал, пропорциональный удвоенному значению максимального усредненного потока в ярме: $2 \Phi_{\text{я max}+} \sim 2 \Phi_{\text{я max}-} S_{\text{и}}$.

Параметром, пропорциональным коэрцитивной силе, является ток размагничивания $I_{\text{р}}$, измеренный при $\Phi_{\text{я}} = 0$. Магнитная предыстория образца обуславливает наличие в замкнутой цепи потока $\Phi_{\text{я0}}$. Дополнительное размагничивание перед началом измерений удлиняет цикл работы прибора, но не всегда устраняет погрешность, вызванную неполным размагничиванием. Для измерения значения $I_{\text{р}}$, независимо от магнитной предыстории изделия, необходимо считывать значение линейно нарастающего тока размагничивания в момент равенства магнитного потока нулю в новой системе координат для симметричной петли гистерезиса. Для перехода к новой системе координат следует сместить ось wI на длину отрезка $\Phi_{\text{я0}}$ в сторону большего по абсолютной величине из значений $\Phi_{\text{я max}}$.

После этого преобразования петля станет симметричной относительно новой оси (wI)*. Размер отрезка смещения можно определить как $|\Phi_{\text{я0}}| = 0,5[|\Phi_{\text{я max}+}| - |\Phi_{\text{я max}-}|]$. Эту операцию осуществляет блок нуль-компаратора, подающий в момент протекания через переключку нулевого потока управляющий импульс, который поступает на устройство выборки и хранения (УВХ).

После прохождения импульса размагничивающего тока в соответствующих УВХ записываются значения $B_{\text{с}}$ и $I_{\text{р}}$. Сиг-

нал с каждого УВХ поступает на соответствующие компараторы окна, которые с помощью светодиодов, расположенных на передней панели прибора, регистрируют попадание каждого из параметров в заданную область годности или выход из нее. Для выбора оптимальной амплитуды намагничивающих импульсов, при которой разность значений параметров испытуемого и стандартного образцов максимальна, предусмотрено ступенчатое регулирование значения намагничивающего тока.

Для определения количества остаточного аустенита в рабочих валках холодной прокатки разработан специальный прибор – аустенитомер (рис. 16.9). В качестве намагничивающего устройства используют переносной электромагнит специальной конструкции, с помощью которого замыкают испытуемый участок вала. В намагничивающую обмотку подают мощный импульс тока, получаемый рядом конденсаторов большой емкости. Выделяемая мощность в импульсе – 10 кВт. Конденсаторы в накопительном устройстве заряжаются через диод и сопротивление от сети переменного тока 220 В. В приборе применено специальное коммутирующее устройство, в котором используется импульсный модуляторный тириatron. Для создания определенной частоты повторения и обеспечения строгой последовательности заряда и разряда конденсаторов применен мультивибратор. Импульс магнитного потока в сердечнике электромагнита создает в индукционной обмотке импульс ЭДС индукции, который фикси-

руется при помощи измерительного устройства. Предусмотрено размагничивание участка изделия, на котором проводят измерение.

Прибор градуируется по валкам с известным количеством остаточного аустенита и может быть использован при определении количества остаточного аустенита в термообработанных изделиях, содержащих по одной ферромагнитной и парамагнитной фазе. Наличие в стали неконтролируемого количества карбидной фазы существенно снижает точность определения остаточного аустенита. Использование импульсного намагничивания ограничивает зону контроля глубиной проникновения импульсного поля в металл.

16.5. КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ И ПОРИСТОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Дифференциальные магнитные приборы получили распространение при определении пористости ферромагнитных материалов, а также при решении задач структуроскопии изделий из спеченных сталей. Физической предпосылкой определения пористости является то, что разность магнитных потоков, фиксируемая преобразователем дифференциального прибора, пропорциональна не только намагниченности исследуемой детали, но и объему ферромагнитной фазы в ней. Поскольку увеличение числа пор равносильно сокращению объема ферромагнитной фазы при прочих равных условиях, то по измеренному значению намагниченности насыщения можно оценить пористость в исследуемом материале. Рис. 16.10 отражает закономерности изменения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы при увеличении пористости в спеченной стали 30НМ при фиксированном содержании углерода 0,19 %. Наблюдаемый разброс экспериментальных точек, по-видимому, обусловлен неоднородностями химического и фазового составов образ-

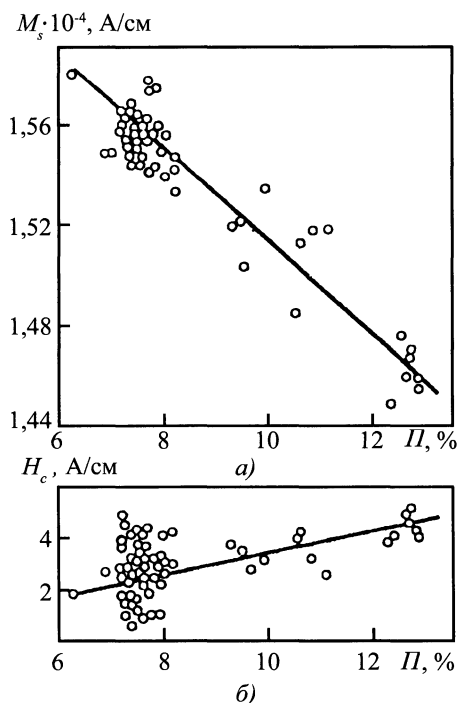


Рис. 16.10. Зависимости намагниченности насыщения (а) и коэрцитивной силы (б) от пористости стали 30НМ

цов, что характерно для сталей, спеченных из смеси порошков исходных компонентов.

На примере спеченного сплава ЖГр1Д2,5К0,8 показана возможность использования дифференциального магнитного прибора для решения задач структуроскопии и определения пористости. По значению коэрцитивной силы (тока размагничивания) судят о структурном состоянии стали, а по значению индукции насыщения – о пористости изделия. Экспериментальные результаты приведены на рис. 16.11 в виде наклонного к осям ординат и абсцисс параллелограмма, в котором линии с одинаковыми значениями пористости P идут параллельно друг другу под небольшим углом относительно оси абсцисс, а линии, соответствующие одинаковым микроструктурам, – параллельно друг другу под небольшим углом к оси ординат.

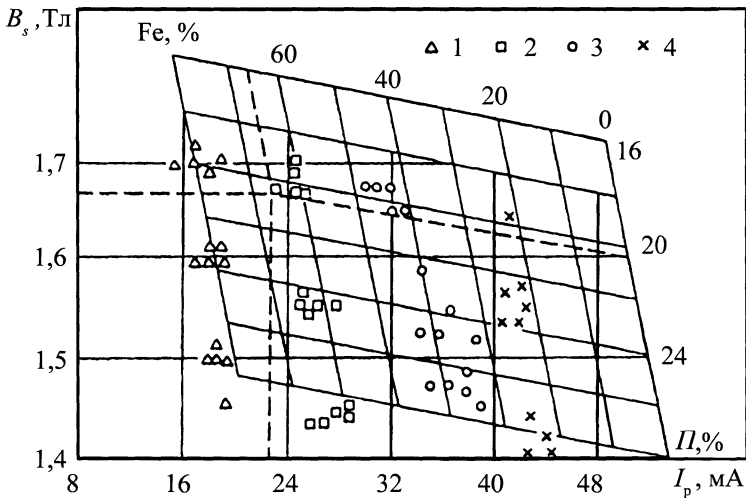


Рис. 16.11. Влияние содержания феррита и пористости на индукцию насыщения и коэрцитивную силу спеченного сплава ЖГр1Д2,5К0,8:
 1 – перлит + 80 ... 90 % феррита; 2 – перлит + 60 % феррита; 3 – перлит + 40 % феррита; 4 – перлит + 20 % феррита

Рис. 16.12 иллюстрирует *параллелограмм годности* изделий при непосредственном измерении на дифференциальном магнитном приборе. Параллелограмм годности соответствует деталям, имеющим структуру пластинчатого перлита с содержанием феррита до 50 % и пористостью в диапазоне 17 ... 25 %. Выше параллелограмма годности попадают изделия с пористостью более 25 %, ниже – с пористостью менее 17 %. Справа от параллелограмма попадают изделия с завышенным содержанием феррита, а слева – с наличием цементитной сетки.

На рис. 16.13 приведен график, отражающий взаимосвязь значений H_c и M_s для образцов из спеченной стали 30НМ с массовой долей углерода и пористостью. В отличие от рис. 16.11 на осях параллелограмма указано не содержание феррита, а количество углерода в спеченной стали. С помощью этого графика при определенных опытным путем границах годности можно по измеренным значениям H_c и M_s

сортировать изделия на годные и бракованные по пористости и содержанию углерода.

Для удобства анализа и представления информации, получаемой с помощью дифференциальных магнитных приборов, в дополнение к ним создан матричный программируемый компаратор МПК-1, использование которого позволяет:

- формировать в собственном запоминающем устройстве в режиме обучения эталонные описания классов контролируемых изделий;

- осуществлять визуализацию результатов текущих измерений и эталонного описания классов на двумерной проекции N -мерного пространства признаков с выводом изображения на экран дисплея;

- принимать решения о принадлежности контролируемого изделия к тому или иному классу с возможностью управления исполнительным механизмом для автоматизации контрольных операций.

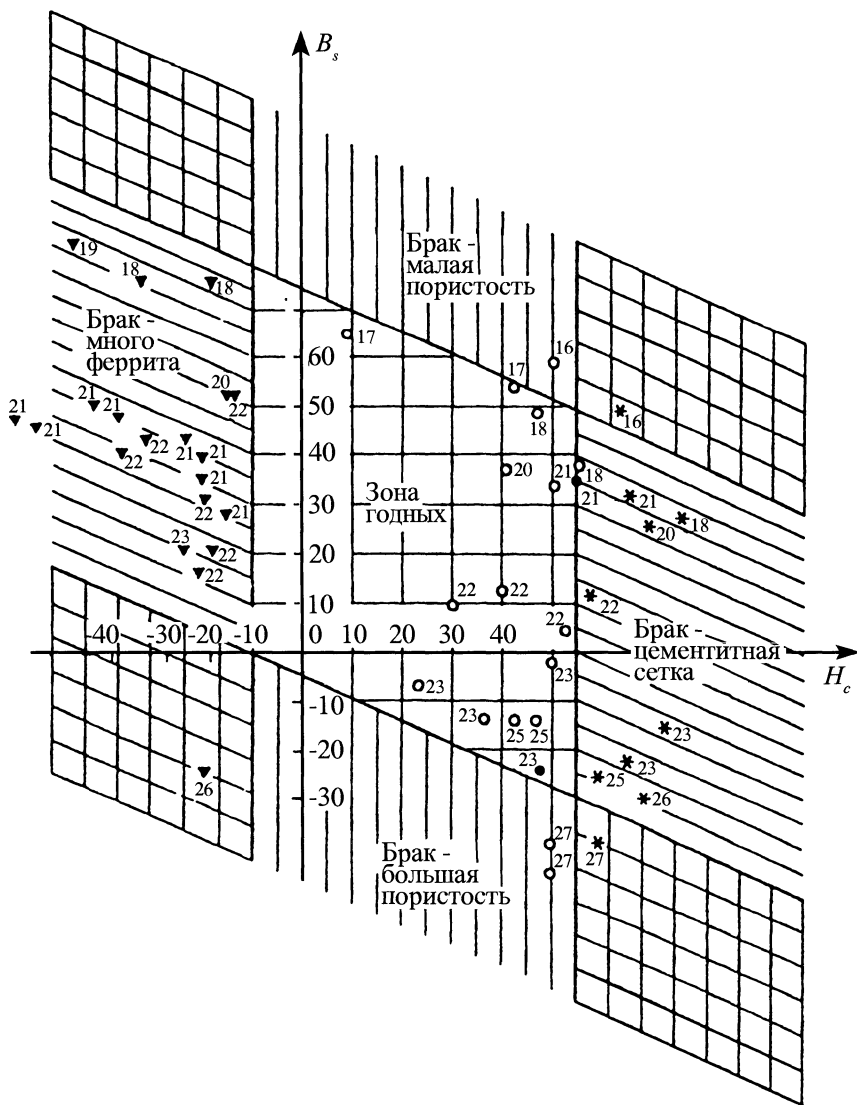


Рис. 16.12. Показания дифференциального магнитного прибора для изделий, имеющих различные структурные состояния и пористость

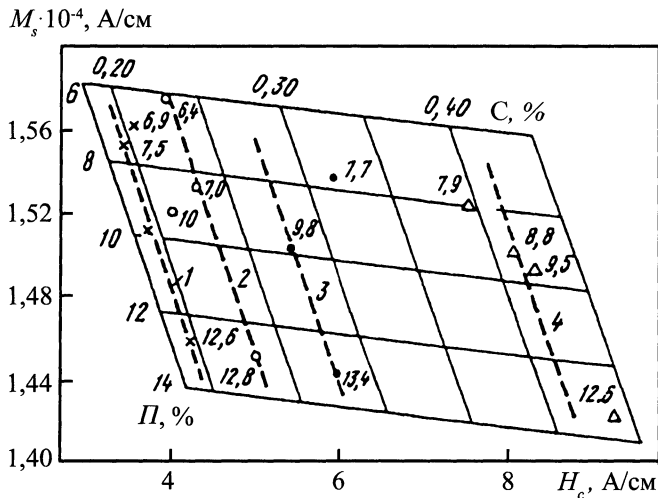


Рис. 16.13. Влияние массовой доли углерода и пористости на намагниченность насыщения и коэрцитивную силу спеченной стали 30NM

Таким образом, фазовый магнитный анализ, основанный на измерении структурно-нечувствительных характеристик ферромагнитных материалов, широко используется не только в исследовательской практике при решении задач физического металловедения, но и для неразрушающе-

го определения фазового состава и пористости в промышленных изделиях. Сочетание при контроле фазочувствительных и структурно-чувствительных магнитных параметров позволяет определить качество спекания изделий порошковой металлургии.

МЕТОД ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ

17.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Из-за магнитной анизотропии ферромагнитных монокристаллов энергия, необходимая для их намагничивания, сильно зависит от направления поля относительно кристаллографических осей. Соответственно, в кристалле имеются оси легкого и трудного намагничивания, а магнитный момент отдельного домена в отсутствие внешнего поля совпадает с направлением одной из осей легкого намагничивания (ОЛН). Большинство реальных ферромагнитных образцов представляют собой поликристаллы с более или менее хаотическим распределением ориентации отдельных кристаллитов, поэтому магнитные моменты доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы беспорядочно и образец в целом оказывается размагниченым.

Если ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле H , то ориентация доменов, определяющая общее размагниченное состояние (рис. 17.1, а), становится энергетически невыгодной. При этом увеличиваются те домены, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля H , за счет тех доменов, где этот угол больше (энергетически менее выгодных). Процесс намагничивания, связанный с изменением геометрического положения границ и значений намагниченности доменов, называется *смещением доменных границ* (рис. 17.1, б). После того как практически весь кристалл намагничен вдоль ОЛН (рис. 17.1, в) процессы смещения в основном заканчивают-

ся. Дальнейшее увеличение намагниченности M образца происходит за счет процессов вращения, т.е. отклонения вектора намагниченности от ОЛН к направлению действия внешнего поля H . Завершение процессов вращения приводит к намагниченности образца до значения намагниченности насыщения M_s (рис. 17.1, г).

Необратимые смещения доменных границ (ДГ) называют *скачками Баркгаузена* (СБ), по имени немецкого физика, впервые их обнаружившего. Эти скачки Г. Баркгаузен наблюдал в виде шума, возникающего в телефоне, соединенном через усилительную схему с катушкой, охватывающей намагничиваемый ферромагнитный образец при медленном намагничивании.

Изучение скачков (эффекта) Баркгаузена вносит существенный вклад в понимание физических процессов при перемагничивании ферромагнитных материалов и позволяет изучать динамику перестройки доменной структуры, когда отсутствуют или затруднены методы непосредственного ее наблюдения.

При изменении магнитного состояния ферромагнитного образца по кривой намагничивания или петле гистерезиса, СБ происходят не при всех значениях приложенного внешнего магнитного поля. Для каждого ферромагнитного образца в соответствии с его структурой и энергетическим состоянием скачки намагничивания начинаются при некотором вполне определенном значении напряженности магнитного поля (поле старта H_0) и заканчиваются при другом значении напряженности магнитного поля (поле финиша H_Φ). Наиболее интенсивно СБ происходят при изменении магнитного состояния по кру-

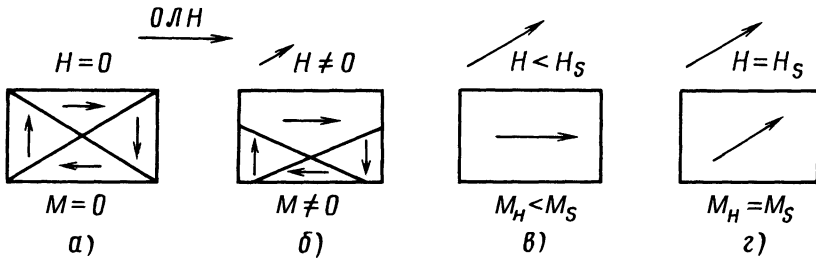


Рис. 17.1. Процесс перемагничивания ферромагнетика

той части кривой намагничивания и "спинке" петли гистерезиса при значении напряженности магнитного поля, близком к значению коэрцитивной силы H_c ферромагнетика.

Методика исследования магнитного эффекта Баркгаузена (ЭБ) сводится к следующему. Исследуемый образец или участок образца перемагничивается линейно изменяющимся циклическим магнитным полем $H(t)$. Возникающие при этом в измерительной катушке (вследствие СБ) и периодически повторяющиеся на каждом цикле перемагничивания, импульсы ЭДС регистрируются и анализируются средствами импульсной техники. Регистрируемый поток импульсов магнитных шумов (МШ) характеризует ЭБ следующим образом:

1. Форма импульса ЭДС СБ имеет вид экспоненциально затухающего сигнала.

2. Объем, в котором происходит изменение намагниченности при одном скачке, имеет порядок 10^{-4} мм³, амплитуда импульса ЭДС в измерительной катушке $10^{-4} \dots 10^{-3}$ В, длительность $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с.

3. Распределение СБ по значениям магнитного момента, амплитуде и длительности импульсов ЭДС СБ во многом идентичны и характеризуются наличием наиболее вероятного значения.

4. Спектральная плотность ЭДС СБ имеет две характерные частоты ω_1 (10^3 Гц) и ω_2 ($5 \cdot 10^3$ Гц), выше и ниже которых наблюдается спад кривой спектральной плотности. С увеличением скорости пере-

магничивания частота ω_1 повышается, а частота ω_2 практически не изменяется. Спектральная плотность достигает максимума при значениях напряженности магнитных полей порядка коэрцитивной силы и определяется формой одиночного импульса от СБ.

5. Распределение числа СБ по петле гистерезиса имеет экстремальный характер, подобный изменению дифференциальной магнитной восприимчивости ферромагнетика. Максимальная плотность СБ наблюдается при значениях напряженности магнитных полей, близких к коэрцитивной силе. Повторяемость характера распределения СБ от цикла к циклу перемагничивания достаточно высока.

6. Параметры ЭБ существенно зависят от различного ряда внешних воздействий и структурного состояния ферромагнетика. Основные результаты исследований ЭДС СБ в ферромагнетиках с положительной магнитоотрицательной λ при изменениях приложенных механических напряжений:

- значения и спектральная плотность импульсов ЭДС СБ с увеличением растягивающей нагрузки возрастают, а при сжатии уменьшаются, причем в области упругих напряжений эти зависимости близки к линейным;

- огибающие ЭДС СБ при растяжении образцов увеличиваются по амплитуде и сужаются. Максимум огибающих при этом смещается к области меньших значений напряженности магнитных полей.

7. Характерной особенностью ЭБ является то, что за счет скин-эффекта СБ могут регистрироваться только в поверхностном слое исследуемого образца, хотя изменение намагниченности посредством СБ происходит по всему объему перемагничиваемого материала. Толщина этого слоя оценивается по-разному (от 0,1 до 6 мм) и в значительной степени зависит от параметров измерительной аппаратуры.

Магнитострикционные скачки рассматривались как вид сигналов акустических шумов и исследовались при помощи соответствующей аппаратуры в ультразвуковом диапазоне.

Методика исследования акустических шумов заключается в следующем. Исследуемый образец перемагничивается линейно изменяющимся магнитным полем $H(t)$, возникающие при этом сигналы магнитно-акустических шумов (МАШ) регистрируются пьезопреобразователем. Регистрируемый поток импульсов характеризуется следующим образом:

1. Форма импульса МАШ имеет вид периодического затухающего сигнала.

2. МАШ максимальны у материалов с большей магнитострикцией насыщения; при этом отношение сигнал/шум в преобразователях МАШ меньше, чем при регистрации ЭДС СБ.

3. Распределение мощности сигналов МАШ на полупериоде перемагничивания в конструкционных сталях имеет два максимума на изгибах петли гистерезиса и минимум между ними – в области значений коэрцитивной силы.

4. Характерной особенностью МАШ является то, что сигналы регистрируются со всего объема перемагничивания ферромагнетика.

Возможность использования при контроле сигналов МАШ дополняет магнитный ЭБ, и их совместное применение более полно отражают процессы перемагничивания ферромагнитных материалов. Механические напряжения существенно влияют на характеристики метода ЭБ в его

магнитном и акустическом проявлениях, что позволяет применять этот метод для неразрушающего контроля напряженного состояния металлоизделий.

При классификации информативных параметров МШ и МАШ для проблем неразрушающего контроля следует выделить общие характеристики:

1) *энергетические*, которые отражают мощность или интенсивность перемагничивания ферромагнетика СБ, – мощность сигналов $P_{МШ}$ и $P_{МАШ}$ (на практике обычно измеряют среднее квадратическое значение напряжения $E_{МШ}(t)$ и $E_{МАШ}(t)$) и спектральную плотность $q_{МШ}(\omega)$ и $q_{МАШ}(\omega)$;

2) *эмиссионные*, отражающие также частотные свойства МШ и МАШ, – число выбросов $N_{МШ}(C, t)$ и $N_{МАШ}(C, t)$ за уровень амплитудной селекции C .

По способу обработки во времени различают средние и текущие параметры.

К *средним* параметрам относят характеристики МШ и МАШ, регистрируемые и усредняемые за один или несколько периодов перемагничивания: среднее (средневыпрямленное) напряжение $E_{ср}$, спектральная плотность $q_{ср}(\omega)$ и среднее число выбросов при заданном уровне селекции C – $N_{ср}(C)$. Среднее (средневыпрямленное) значение $E_{ср}$ наиболее доступно для аппаратурного анализа, обеспечивает высокую повторяемость результатов измерений.

Среднее число выбросов при заданном уровне селекции содержит информацию как об энергетических, так и о частотных свойствах МШ и МАШ. Этот параметр имеет дискретный характер, что является существенным преимуществом при проектировании аппаратуры с цифровой обработкой информации. Однако нестационарность процесса СБ в большей степени влияет на $N_{ср}$, чем на $E_{ср}$, что приводит к необходимости усреднения за несколько циклов перемагничивания и, соответственно, к увеличению времени измерений.

Использование в качестве информативного параметра спектральной плотности $q(\omega)$ требует создания сложной аппаратуры и на практике обычно используется в исследовательских целях.

Общим недостатком средних параметров является отсутствие информации о характере распределения МШ и МАШ по величине поля перемагничивания, который отражает существенные особенности физического состояния объекта контроля.

Текущие информативные параметры формируются измерением энергетических или частотных характеристик МШ и МАШ с усреднением за интервал, который намного меньше периода перемагничивания. Среди текущих характеристик следует выделить, прежде всего, напряжение $E_{\text{МШ}}(t)$ и $E_{\text{МАШ}}(t)$ и число выбросов $N_{\text{МШ}}(C, t)$ и $N_{\text{МАШ}}(C, t)$.

В практике НК текущие характеристики получили широкое распространение на стадии исследований методов в связи с их высокой чувствительностью к контролируемому параметру изделий и возможностью ее регулирования приборными средствами. Однако на стадии контроля требуются дополнительные затраты для отстройки от мешающих факторов.

Анализ особенностей напряженного состояния конструкционных сталей и изделий из них, физических основ и информативных параметров эффекта Баркгаузена позволяет выделить три основные области применения этого метода.

Первая объединяет параметры, корреляционно связанные с уровнем микронапряжений и характеризующие структурное состояние контролируемого материала, изменение которого в различных работах связывалось либо с режимами термической обработки образцов, либо с получаемыми при этом механическими характеристиками – прочностью, твердостью, размером зерна и др.

Во вторую группу входят параметры, характеризующие напряжения 1-го рода (макронапряжения). Независимо от их

происхождения, эти напряжения связаны только с упругими деформациями. Упругие напряжения приводят к изменению константы эффективной кристаллографической анизотропии $K_{\text{эф}}$ и появлению магнитной текстуры, характер которой зависит от соотношения знаков магнитострикции и напряжений. Если обе эти величины имеют одинаковые знаки, то будет расти концентрация тех магнитных фаз, направление вектора M_s в которых наиболее близко к направлению действия напряжений. Таким образом, и в этом случае происходят изменения доменной структуры и, соответственно, изменения параметров СБ. Сильное влияние изменение $K_{\text{эф}}$ оказывает на параметры МАШ. Магнитострикционный механизм предопределяет существенную зависимость параметров сигналов МАШ от направления действия приложенных напряжений, что позволяет предполагать улучшение возможностей контроля напряженного состояния металлоизделий с применением сигналов МШ и МАШ.

Параметры, относящиеся к третьей группе, характеризуются одновременными изменениями уровня макро- и микронапряжений. В рамках существующих методик контроля оценить влияние на параметры эффекта Баркгаузена одного из этих факторов при неизвестном втором не представляется возможным. Как отмечалось ранее, гарантировать идентичность, например, структурного фактора (микронапряжений), когда его изменения вызваны случайными флуктуациями режимов технологической обработки изделий, на практике крайне сложно. Этим, по-видимому, и объясняется тот факт, что метод ЭБ не нашел еще своего места в системах неразрушающего контроля качества в условиях серийного производства, хотя прекрасно зарекомендовал себя при решении многих исследовательских задач.

Методики контроля макронапряжений построены на корреляционных зависимостях амплитуды МШ от механиче-

ских напряжений, полученных при нагружении образцов. Особое внимание уделяется технологии изготовления образцов: она должна в точности соответствовать технологии изготовления контролируемого объекта. Это условие зачастую невыполнимо на практике, особенно в случае контроля крупногабаритных объектов или изделий серийного производства, при случайных колебаниях химического состава в пределах марки стали, режимах термических и формообразующих операций в пределах допустимых значений.

Помимо способа решения задачи контроля макронапряжений с использованием метода ЭБ путем разработки многопараметровой аппаратуры, существует и второй путь – создание комплексных методик, сочетающих использование нескольких методов НК, например, с помощью сигналов МШ и МАШ. Однако необходимо отметить, что ни принципов построения, ни примеров практической реализации таких методик в известных авторам работах нет, хотя целесообразность их разработки очевидна.

17.2. МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ШУМОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ

Основными задачами разработки методов и аппаратуры для контроля напряжений на основе ЭБ является определение информативных параметров, необходимых и достаточных для повышения достоверности измерений, исследование связи этих параметров с физико-механическими характеристиками конструкционных сталей и создание соответствующих алгоритмов контроля.

Необходимо отметить, что сигналы МШ и МАШ, используемые в НК и при проведении исследований в области физики ферромагнетизма имеют несколько различный характер, хотя и обусловлены одной причиной – скачками Баркгаузена.

Относительно высокая скорость перемагничивания – $10^3 \dots 10^5$ А/(м·с), используемая в средствах НК свойств конструкционных сталей, не позволяет регистрировать и анализировать параметры каждого дискретного акта скачкообразного изменения намагниченности, как это принято в физических исследованиях при скоростях перемагничивания до 10^2 А/(м·с) или при контроле тонких пленок и проволок. Характер сигналов, используемых в НК, определяется потоком случайных по амплитуде и времени импульсов ЭДС СБ и МАШ, а также электродинамическими переходными процессами в измерительной катушке и пьезопреобразователе.

В первичном преобразователе с циклическим перемагничиванием МШ можно считать центрированным случайным процессом. Центрирование заключается в компенсации гармоник частоты перемагничивания и обычно осуществляется за счет соответствующего конструктивного исполнения перемагничивающих и измерительных обмоток ПП.

17.2.1. Базовая модель приборов серии АФС

Для экспериментальных исследований технологических напряжений и их контроля разработана серия приборов типа АФС (анализатор ферромагнитной структуры). Базовой моделью является прибор АФС-3 (рис. 17.2).

В приборе реализованы режимы измерения энергетических и эмиссионных характеристик МШ.

Энергетические характеристики:

1) значение средневыпрямленного напряжения МШ за один или n циклов перемагничивания

$$E_{\text{МШ}} = e_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} e(t) dt; \quad (17.1)$$

2) значение текущего средневыпрямленного напряжения МШ за один или n циклов перемагничивания

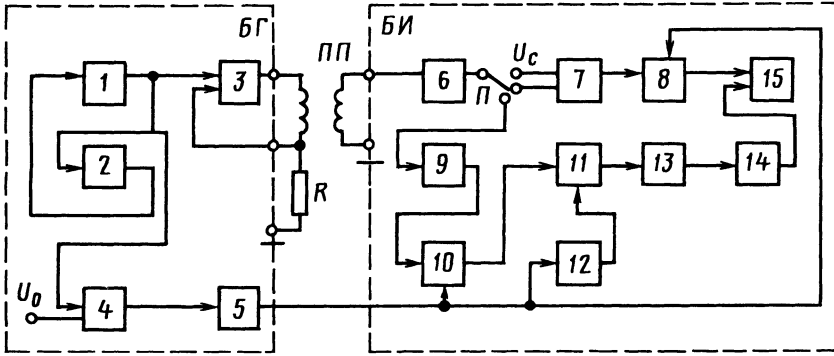


Рис. 17.2. Структурная схема прибора АФС-3

$$e_{\text{МШ}}(t) = e(t_j) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{\theta} \int_{t_j - \theta/2}^{t_j + \theta/2} e(t) dt. \quad (17.2)$$

Эмиссионные характеристики:

1) среднее число выбросов МШ за уровень селекции C

$$N_{\text{ср}}(C) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{T_n}{T_{\text{П}}} \int_0^{T_n} M(C, t) dt; \quad (17.3)$$

2) текущее число выбросов МШ за уровень селекции C

$$N(C, t_j) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{\theta} \int_{t_j - \theta/2}^{t_j + \theta/2} J(C, t) dt. \quad (17.4)$$

Прибор АФС-3 функционально состоит из следующих блоков: генератора (БГ), измерения (БИ) и первичного преобразователя (ПП). Блок генератора предназ-

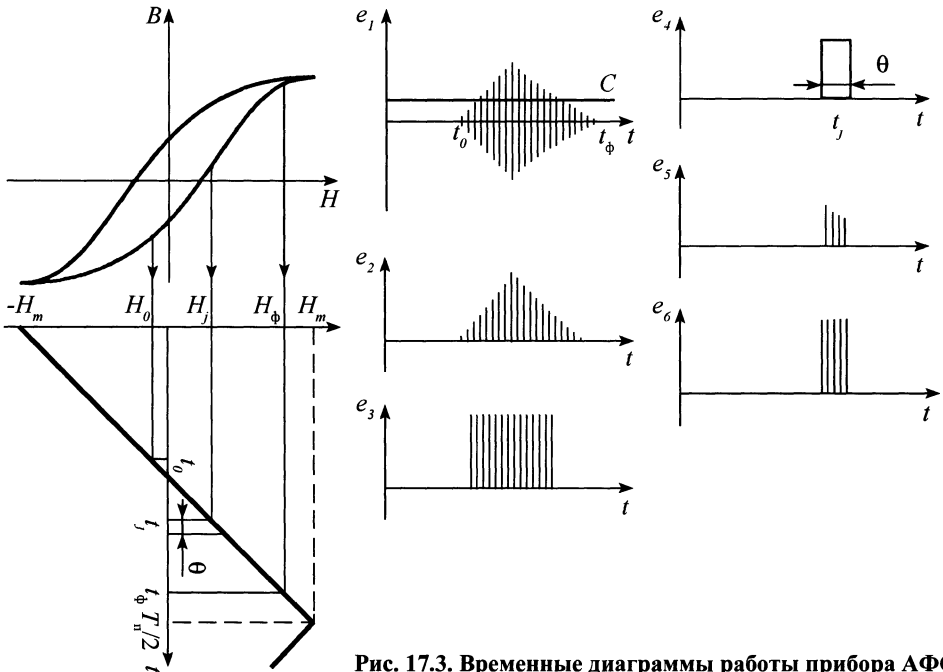


Рис. 17.3. Временные диаграммы работы прибора АФС-3

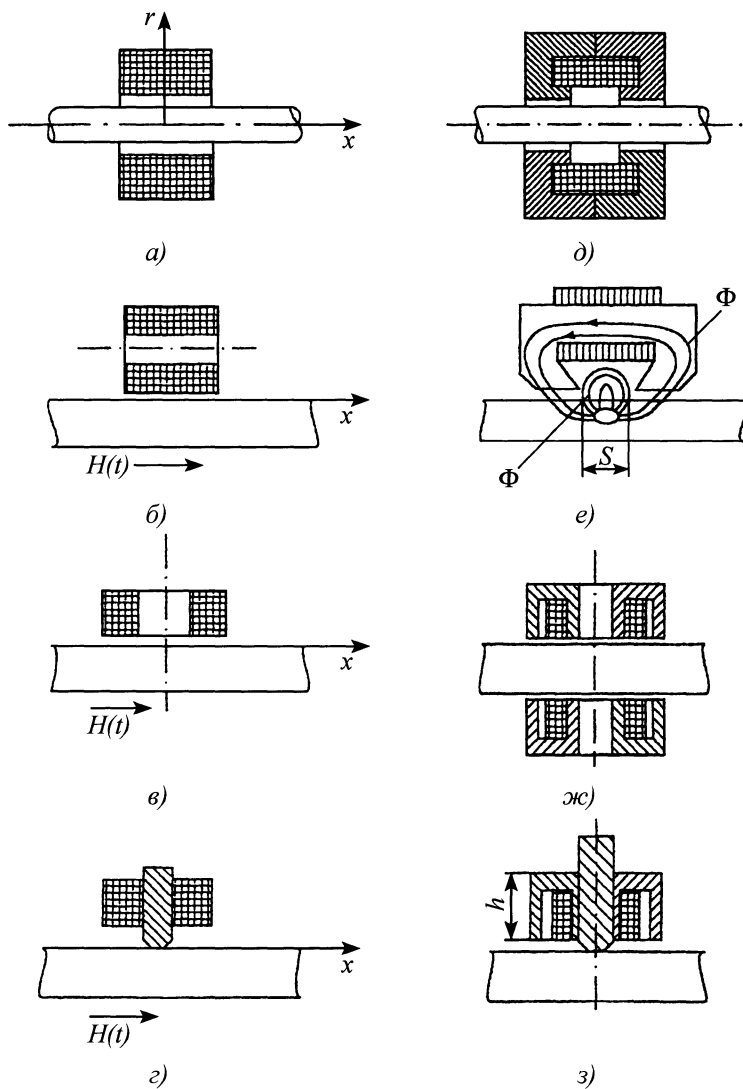


Рис. 17.4. Основные типы конструкций ПП

начен для питания ПП линейно изменяющимся током и формирования строб-импульса длительностью θ . Собственно генератор включает интегратор 1 (см. рис. 17.2), триггер 2 и усилитель мощности 3, охваченный отрицательно обратной связью по току (сигнал обратной связи снимается с резистора R). Частота тока перемагничивания регулируется изменением постоянной времени интегратора 1.

Схема формирования строб-импульса включает пороговый элемент 4 и ждущий мультивибратор 5. Изменяя напряжение U на втором входе порогового элемента, можно изменять временное положение строб-импульса (момент времени t_i) относительно тока перемагничивания.

Принцип действия БИ заключается в усреднении текущих характеристик сигнала МШ, усиленного широкополосным

усилителем δ на интервале, который определяется длительностью строб-импульса. Выбор измеряемого параметра МШ осуществляется посредством переключателя Π . Канал измерения числа выбросов включает пороговый элемент γ и аналоговый ключ δ . Пороговый элемент преобразует сигнал МШ, превышающий уровень селекции C , который определяется напряжением U_c , в последовательность импульсов равной амплитуды. Канал измерения интенсивности МШ содержит детектор θ , аналоговый ключ δ , интегратор Π , схему управления интегратором Π , аналоговое запоминающее устройство Π и аналого-цифровой преобразователь Π . Для оценки интенсивности МШ использован метод среднего выпрямленного. Схема управления интегратором осуществляет его сброс и перепись результата измерения в аналоговое запоминающее устройство, где результат хранится в течение всего периода перемагничивания и визуально отсчитывается с помощью схемы цифровой индикации Π . При реализации режимов (17.1) и (17.2) аналоговые ключи δ и δ постоянно находятся в открытом состоянии.

На рис. 17.3 показаны временные диаграммы, иллюстрирующие принцип действия прибора АФС-3: $e_1(t)$ – выходной сигнал широкополосного усилителя; $e_2(t)$ – выходной сигнал детектора; $e_3(t)$ – выходной сигнал порогового элемента γ (см. рис. 17.2); $e_4(t)$ – выходной сигнал ждущего мультивибратора; $e_5(t)$ – выходной сигнал аналогового ключа δ ; $e_6(t)$ – выходной сигнал аналогового ключа δ .

Прибор АФС-3 снабжен первичными преобразователями проходного (рис. 17.4, а, д, ж), накладного (рис. 17.4, б–г) и комбинированного (рис. 17.4, е) типов. В зависимости от размеров исследуемых образцов параметры системы намагничивания накладных ПП изменяют в пределах: межполюсное расстояние – 6 ... 40 мм;

площадь поперечного сечения – 30 ... 150 мм²; число витков катушки намагничивания – 300 ... 1500; провод ПЭВ – 0,27 ... 1,0 мм.

При исследовании изделий сложной формы рабочая поверхность магнитопровода повторяет геометрию поверхности изделия. В зависимости от конструктивных размеров системы намагничивания ПП позволяет получать магнитное поле напряженностью до 10 кА/м.

17.3. ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ

Основные типы конструкции первичных преобразователей для магнитошумового контроля приведены на рис. 17.4. Преобразователи накладного типа на рис. 17.4, б, е регистрируют тангенциальную составляющую СБ, а преобразователи на рис. 17.4, в–з – нормальную. Преобразователь накладного типа показан также на рис. 17.5. Применение различных типов ПП в устройствах контроля, основанных на эффекте Баркгаузена, дает возможность решать широкий круг проблем НК качества материалов. Однако успех внедрения приборов НК в большей степени определяется эффективностью отстройки от мешающих факторов, когда достигается наилучшее соотношение между сигналом от измеряемого параметра и сигналом помех.

На характеристики ЭДС СБ значительно влияют конструктивные параметры ПП. Эквивалентная схема ПП приведена на рис. 17.6, где: L – индуктивность измерительной катушки; R – ее активное сопротивление, с учетом входного сопротивления преусилителя $R_{вх}$, вносимого ферромагнитным образцом сопротивления потерь R_0 , сопротивления провода обмотки $R_{ом}$; C – суммарная емкость, включающая собственную емкость катушки (межвитковую, межслойную, емкость между первич-

ным слоем и стержнем), емкость монтажа и входную емкость преусилителя.

Для входного напряжения такого контура справедливо выражение

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} j\omega S(\omega) \frac{z_a}{z_a + z_i} e^{j\omega t} d\omega. \tag{17.5}$$

На практике заранее выбрать параметры контура L, C, R и непосредственно связанные с ними конструктивные параметры ПП довольно трудно, потому их подбирают экспериментально. Например, для повышения чувствительности ПП следует увеличить число витков катушки w_0 , а это, в свою очередь, приводит к повышению значений L, C, R , что существенным образом может изменить резонансные свойства ПП, вид входного напряжения $U(t)$ и к тому же повышает уровень тепловых шумов в контуре. Очевидно, необходимо добиваться повышения чувствительности за счет увеличения w_0 при одновременном уменьшении диаметра провода обмотки:

$$U(t) \approx \frac{w_0 m_0}{\tau_0} e^{-t/\tau_0}, \tag{17.6}$$

где m_0 – магнитный момент.

Если длительность t импульса ЭДС $e(t)$ мала по сравнению с постоянной времени контура ПП τ_0 , то соотношение (17.4) намного упрощается. Действительно, ЭДС СБ можно представить в виде $e(t) \approx m_0 w_0 \delta(t)$, а $j\omega S(\omega) \approx w_0 m_0$, где $\delta(t)$ – функция единичного скачка. Следовательно, $U(t)$ будет определяться частотными свойствами контура $\frac{z_a}{z_a + z_i}$. Если, например, параметры контура задать так, что, $R_{вх} \gg R, \mu = \mu_{обр}$ (т.е. вносимое сопротивление $R_0 = 0$, а L не зависит от частоты), то из выражения (17.6) получим

$$U_{max} \approx w_0 m_0 / \tau_0. \tag{17.7}$$

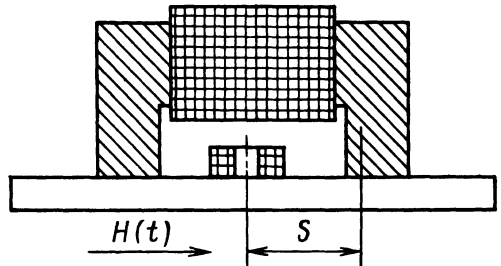


Рис. 17.5. Преобразователь накладного типа

Значение U_{max} пропорционально локальному изменению магнитного момента m_0 , а коэффициент пропорциональности зависит от временного изменения $m(t)$ и расположения области СБ внутри ферромагнетика.

Если импульс ЭДС СБ имеет большую длительность (из-за реакции вихревых токов, наложения нескольких импульсов), для измерения магнитных моментов областей СБ $m(t)$ требуется увеличить постоянную времени контура измерительной катушки τ_0 . Это приводит к большому "мертвому" времени экспериментальной установки. Чтобы избежать этого явления, к выходу ПП после предварительного усилителя подключают электронный интегратор.

Для выбора оптимального режима контроля далее приведены результаты исследований, проведенных с помощью используемого в комплекте прибора АФС первичного преобразователя накладного типа, изображенного на рис. 17.5.

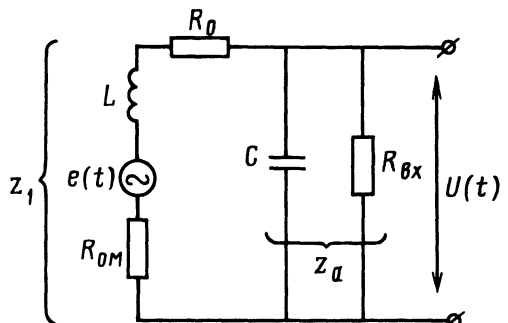


Рис. 17.6. Эквивалентная схема ПП

17.1. Характеристики пьезоэлектрических материалов

Пьезо-материал	Плотность $\rho_m \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Температура Кюри, °С	Диэлектрическая проницаемость		Пьезомодуль $d \cdot 10^{-12}$, м/В					
			ϵ_{11}/ϵ_0	ϵ_{33}/ϵ_0	d_{11}	d_{13}	d_{22}	d_{33}	d_{14}	d_{15}
ЦТС-19	7,00	290	—	1500	—	100	—	200	—	—
ЦТС-21	7,00	410	—	550	—	27	—	67	—	—
ЦТС-22	7,00	330	—	800	—	50	—	100	—	—
ЦТС-23	—	285	—	1050	—	75	—	125	—	—
ЦТС-29	—	350	—	700	—	—	—	—	—	—
ЦТБС-3	—	180	—	2400	—	150	—	300	—	—
PZT-4*	7,50	328	—	1300	—	123	—	280	—	—
PZT-5A*	7,75	365	—	1700	—	171	—	374	—	—
PZT-5H*	7,50	193	—	3400	—	274	—	593	—	—
LiNbO ₃	4,70	1210	44	30	—	1	21	6	—	—
Кварц	2,65	576	4,58	4,68	2,31	—	—	—	0,427	—
Сегнето-ва соль	1,77	18 ... 24	350	—	—	—	—	—	275	—

*Пьезокерамика выпускается фирмой "Клевайт" (США).

В качестве чувствительных элементов преобразователей акустической эмиссии в настоящее время наиболее часто используют различные пьезокерамики (табл. 17.1.) Широкое распространение

получили керамики на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС). Такие пьезоэлементы обладают большими значениями пьезомодуля и высокой диэлектрической проницаемостью.

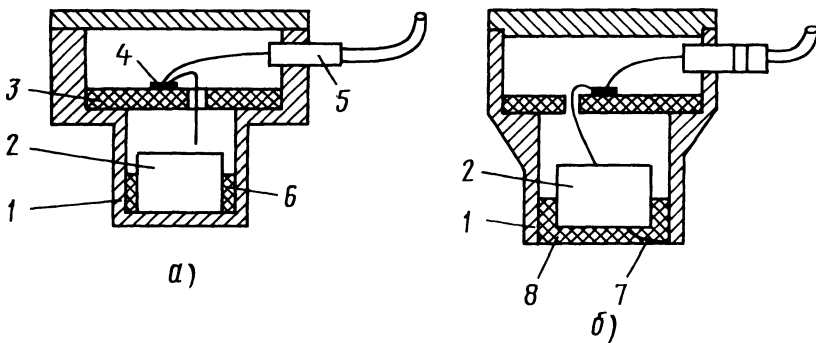


Рис. 17.7. Типичные конструкции преобразователей для регистрации сигналов МАШ (разрез):

1 – корпус с крышкой; 2 – пьезоэлемент; 3 – изоляционная шайба; 4 – токосъемник; 5 – разъем; 6 – слой клея; 7 – провод для соединения нижней поверхности пьезоэлемента с корпусом; 8 – компаунд

Как следует из табл. 17.1, с точки зрения чувствительности наиболее предпочтительно использовать керамики ЦТС-19, ЦТС-23 и ЦТБС-3. Эти материалы имеют также более высокие значения диэлектрической проницаемости, что важно для получения максимально возможной собственной емкости пьезоэлемента.

На рис. 17.7 приведены два примера типичных конструкций преобразователей для регистрации сигналов МАШ. Корпус с крышкой и дном (см. рис. 17.7, а) защищает активный элемент преобразователя от механических повреждений и экранирует токосъемные элементы от электромагнитных помех. В другой конструкции датчика (см. рис. 17.7, б) корпус не имеет дна, и активный элемент в ней защищен слоем эпоксидного компаунда.

Правильный выбор режимов перемагничивания в первичных преобразователях позволяет обеспечить успешный результат контроля свойств ферромагнитных материалов по характеристикам МШ и МАШ.

На рис. 17.8 и 17.9 приведены огибающие средних квадратических значений сигналов МШ и МАШ соответственно для образцов из никеля и высоколегированной стали, перемагничиваемых с частотой $f_n = 10$ Гц. Огибающие смещены одна относительно другой. Это подтверждает разный механизм возбуждения сигналов МШ и МАШ.

С увеличением амплитуды поля тока перемагничивания I_n максимумы МШ и МАШ растут и смещаются в область меньших значений полей. Максимумы двухгорбой кривой МАШ стали сближаются. Изменение средних за период перемагничивания T_n характеристик МШ и МАШ имеет сходный характер: они увеличиваются до значений напряженности магнитных полей, соответствующих предельной петле гистерезиса, затем имеется область плато, где они изменяются незначительно, а потом снижаются. Зависимос-

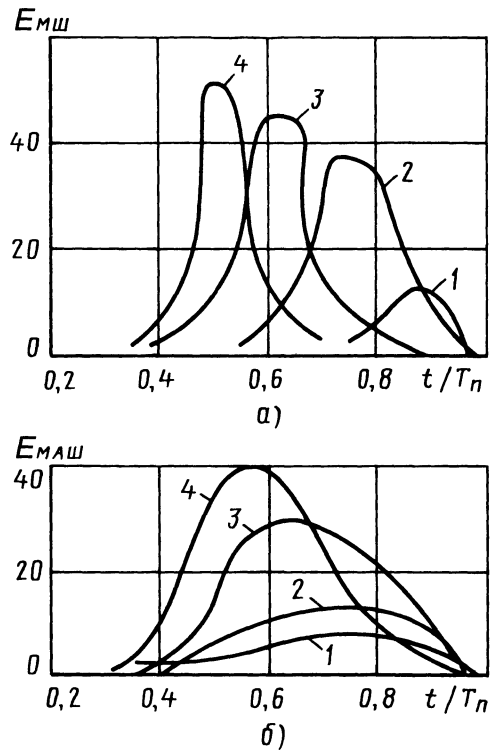


Рис. 17.8. Влияние амплитуды тока перемагничивания I_n на огибающие средних квадратических значений сигналов МШ (а) и МАШ (б) для образца из никеля: 1 - $I_n = 0,14$; 2 - 0,2; 3 - 0,45; 4 - 1,4 А

ти имеют общий характер независимо от режимов термообработки. Характеристики МАШ стремятся к максимальным при больших значениях напряженности полей перемагничивания. Последнее подтверждает, что сигналы МШ регистрируются с поверхностных слоев ферромагнетиков, которые быстрее входят в насыщение, чем более глубокие слои, в которых возбуждаются сигналы МАШ.

С ростом амплитуды перемагничивающего поля происходят два основных процесса: 1) постепенный переход от частных циклов к предельной петле гистерезиса, а следовательно, к предельной петле гистерезиса магнитострикции; 2) увеличение скорости перемагничивания, а также скорости изменения магнитострикции

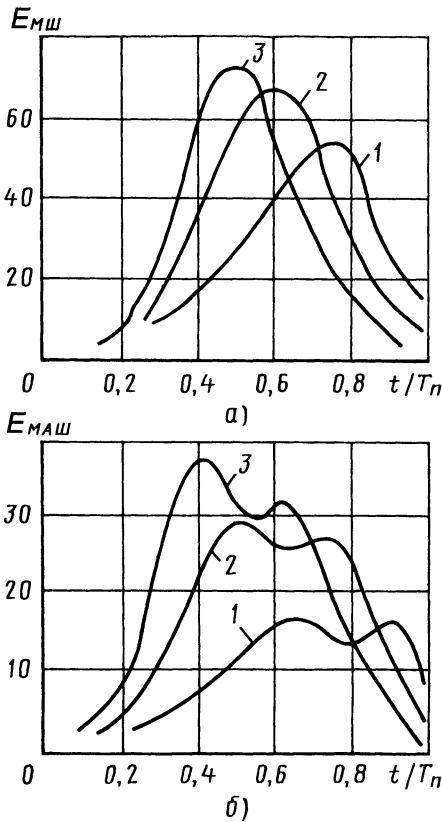


Рис. 17.9. Влияние амплитуды тока перемagnичивания I_n нагибающие средних квадратических значений сигналов МШ (а) и МАШ (б) для образца из высоколегированной стали: 1 – $I_n = 0,1$; 2 – $0,2$; 3 – $0,4$ А

$d\lambda/dH$. Рост $|d\lambda/dH|$ приводит к увеличению мощности сигналов МАШ.

До выхода на предельную петлю гистерезиса рост происходит как вследствие повышения скорости перемagnичивания, так и в результате увеличения магнитострикции λ , соответствующей частному циклу. Последующее незначительное увеличение текущих значений сигнала происходит благодаря росту $d\lambda/dH$ из-за увеличения скорости перемagnичивания.

На рис. 17.10 показан характер изменения средних частотных характеристик сигналов МШ и МАШ (полного за полупериод перемagnичивания числа превы-

шений различных уровней амплитудной дискриминации $N_{cp}(C)$) при увеличении амплитуды перемagnичивающего тока. Число превышений нулевого уровня дискриминации $N_{cp}(0)$ максимально при малых значениях тока перемagnичивания, так как при этом оно соответствует собственным шумам измерительного канала прибора. Различный уровень $N_{cp}(0)$ при $C = 0$ для сигналов МШ и МАШ объясняется разными частотными диапазонами работы усилителей. Общий характер зависимостей $N_{cp}(C)$ при $C \neq 0$ соответствует характеру таких зависимостей для энергетических характеристик сигналов (рис. 17.11).

Увеличение частоты перемagnичивания (рис. 17.12) приводит к росту энергетических характеристик МШ и МАШ

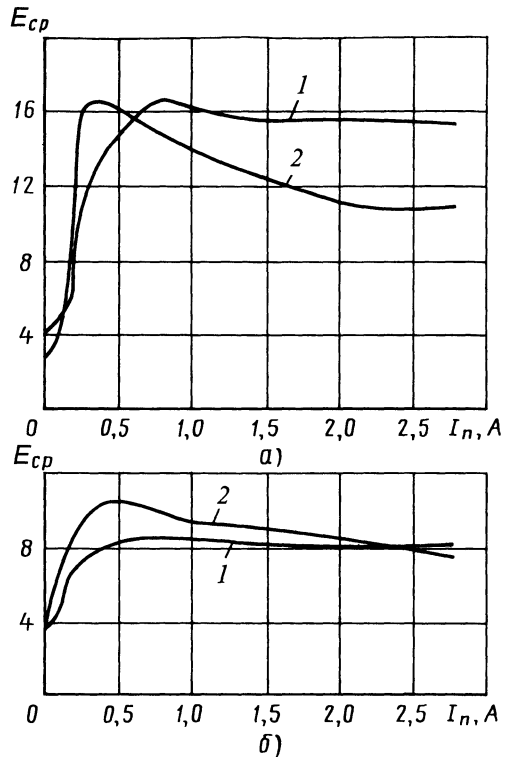


Рис. 17.10. Зависимости средних значений сигналов МШ (1) и МАШ (2) от амплитуды тока перемagnичивания для образцов из никеля (а) и стали 60 (б)

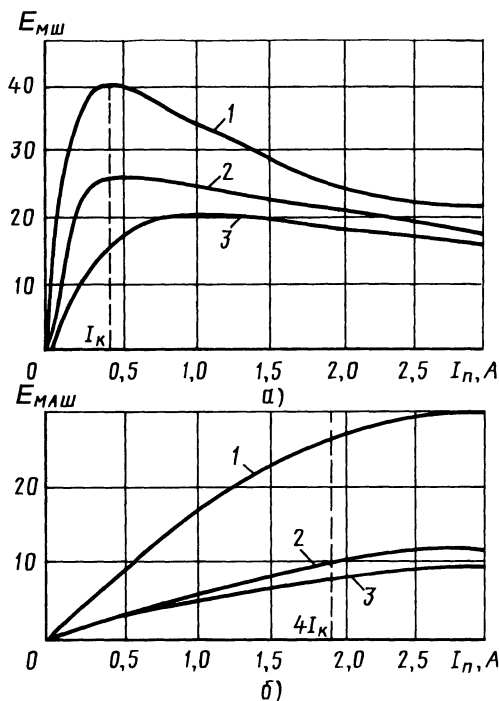


Рис. 17.11. Зависимости средних значений сигналов МШ (а) и МАШ (б) от амплитуды тока перемagnичивания на частоте $f = 100$ Гц для образца из высоколегированной стали:
 1 – в состоянии поставки; 2 – после закалки; 3 – после старения

вследствие повышения скорости перемagnичивания, а следовательно, увеличения интенсивности СБ. Характеристики МАШ изменяются в меньшей степени, так как глубина проникновения поля перемagnичивания, возбуждающая МАШ, уменьшается с увеличением частоты. Эмиссионные характеристики МШ и МАШ при этом изменяются одинаково (экспоненциально снижаются) из-за наложения сигналов МШ и МАШ во времени при увеличении скорости перемagnичивания. Таким образом, рабочий режим ПП при регистрации эмиссионных характеристик МШ и МАШ и при регистрации энергетических характеристик МАШ следует выбирать в области низких частот перемagnичивания, а при регистрации энергетических характеристик МШ – в более высоком диапазоне

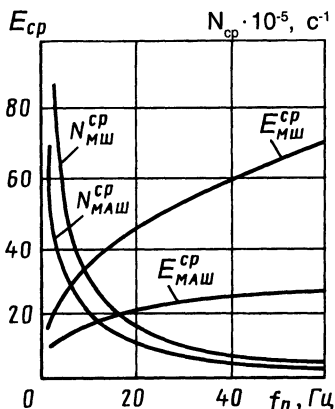


Рис. 17.12. Влияние частоты перемagnичивания на средние значения сигналов МШ и МАШ
 (образец из никеля; $I_n = 0,4$ А; $C = 14$ мкВ)

частот перемagnичивания в целях повышения производительности контроля. В приборах типа АФС диапазон частот выбран в пределах $0,2 \dots 50$ Гц, что позволяет обеспечить режимы ПП, удобные для совместного использования параметров МШ и МАШ.

17.4. СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

17.4.1. Эксперимент и оборудование

В качестве материалов для исследований использованы стали трех классов: углеродистые (стали 20, 35 и 60), углеродистые легированные (35ХЗНМ, 30ХГСН2А, 45Х1) и высоколегированные мартенситно-старяющие.

Разный уровень микронапряжений и, соответственно, прочностных свойств задавали посредством изменения температуры отпуска или старения образцов. Температуры отпуска и число групп образцов из углеродистых и легированных сталей выбирали таким образом, чтобы степень изменения механических свойств между группами образцов составляла $5 \dots 15$ %, а весь диапазон изменения охватывал наиболее часто встречающиеся в машиностроении режимы термообработки деталей из этих сталей.

**17.2. Результаты испытаний образцов из углеродистых
и углеродистых легированных сталей**

Марка стали	Номер группы образца	$T_{\text{зак}}^*$, °C	$T_{\text{отп}}^{**}$, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	НВ	Микроструктура
Сталь 20	0.1	920	190	780	435	Мартенсит отпуска
	0.2		250	640	408	
	0.3		350	610	321	Сорбит с ориентацией по мартенситу
	0.4		450	610	239	
	0.5		550	480	241	Сорбит
	0.6		650	420	174	
Сталь 35	1.1	920	190	1420	480	Мартенсит отпуска
	1.2		250	1410	415	
	1.3		350	1040	352	Сорбит с ориентацией по мартенситу
	1.4		450	900	298	
	1.5		550	630	248	
	1.6		650	500	170	
Сталь 60	5.1	830	520	1100	35 HRC	Сорбит
	5.2		620	760	25 HRC	
	5.3		–	580	19 HRC	
35X3NM	2.1	900	180	1720	514	Мартенсит отпуска
	2.2		320	1400	444	Троостомартенсит
	2.3		360	1360	440	Сорбит с ориентацией по мартенситу
	2.4		420	1280	430	
	2.5		520	1220	412	Перлит
	2.6		580	1080	376	
	2.0		–	640	241	
30XГСН2А	3.1	900	180	1530	467	Мартенсит отпуска
	3.2		360	1320	429	Сорбит с ориентацией по мартенситу
	3.3		440	1270	396	
	3.4		540	1160	348	Сорбит
	3.0		–	410	209	Перлит
45X1	4.1	860	180	178	532	Мартенсит отпуска
	4.2		240	172	505	Троостосорбит с ориентацией по мартенситу
	4.3		360	152	444	
	4.4		480	122	356	
	4.5		540	105	312	Сорбитообразный перлит
	4.0		–	38	212	

*Время выдержки при $T_{\text{зак}}$ – 2 ч, охлаждение в масле.

**Время выдержки при $T_{\text{отп}}$ – 2 ч, охлаждение на воздухе.

17.3. Результаты испытаний образцов из высоколегированной стали

Номер группы образца	$T_{\text{стар}}^*$, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ_1 , %	KCV, МДж/м ²	HRC
6.1	20	900	71	19,2	31
6.2	100	920	71	17,8	33
6.3	200	960	70	14,6	35
6.4	300	1080	69	9,0	38
6.5	400	1460	58	4,6	46
6.6	450	1900	34	3,9	54
6.7	480	2100	51	3,7	56
6.8	500	2250	46	3,1	58
6.9	520	2380	40	2,5	58
6.10	550	2350	30	2,2	57
6.11	580	2120	24	2,0	55

* Температура старения.

После термообработки на трех образцах-свидетелях из каждой группы определяли механические характеристики ($\sigma_{0,2}$ и твердость НВ для углеродистых и легированных сталей; $\sigma_{0,2}$, твердость HRC, относительное сужение ψ , ударная вязкость KCV для мартенситно-старяющихся сталей), исследовали их структуру.

При определении механических характеристик использованы разрывные образцы по ГОСТ 1497–84, ударные по ГОСТ 9454–78 и стандартные методики испытаний. Микроструктуру образцов устанавливали посредством металлографического анализа с применением микроскопа Neophot при увеличении $\times 500$.

Режимы термообработки, механические характеристики, усредненные по результатам испытаний трех образцов-свидетелей, а также результаты исследований структуры образцов каждой группы сведены в табл. 17.2 и 17.3.

Для исследований параметров МШ и МАШ использованы плоские разрывные образцы с отверстиями под шпильки, площадь сечения рабочей части 2×16 мм. Рабочие части образцов шлифовали до шероховатости поверхности $Rz = 2,5$ мкм.

Шлифование проводили с обильным охлаждением для предотвращения разогрева.

Нагружение образцов осуществлялось с помощью разрывной машины Р-10, позволяющей создавать усилия до 10^5 Н и регистрировать диаграмму нагружения.

Параметры МШ и МАШ изучены с помощью структуроскопа АФС-5, структурная схема которого приведена на рис. 17.13.

В приборе реализуются следующие режимы измерения параметров электромагнитных и акустических сигналов:

1) измерение средних квадратических значений $E_{\text{ср}}$ сигналов МШ и МАШ за один или несколько циклов перемагничивания;

2) измерение текущих средних квадратических значений $e_{\text{МШ}}(t)$ и $e_{\text{МАШ}}(t)$ в фиксированных точках петли гистерезиса;

3) измерение среднего числа превышений $N_{\text{ср}}$ сигналами МШ и МАШ выбранных уровней амплитудной дискриминации C и C' ;

4) измерение текущей скорости счета сигналов МШ и МАШ для соответствующей

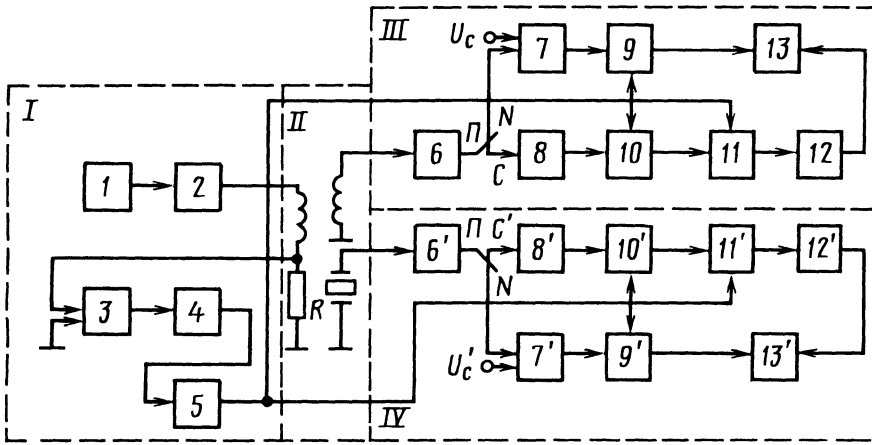


Рис. 17.13. Структурная схема прибора АФС-5:

I – блок перемагничивания: 1 – генератор треугольного напряжения; 2 – усилитель мощности; 3 – нуль-орган; 4, 5 – ждущие мультивибраторы; *II* – блок преобразователей;

III, *IV* – блоки измерения параметров электромагнитных и акустических сигналов:

6, 6' – усилители; 7, 7' – амплитудные дискриминаторы; 8, 8' – детекторы; 9, 9', 10, 10' – аналоговые ключи; 11, 11' – блоки измерения; 12, 12' – аналого-цифровые преобразователи; 13, 13' – цифровые индикаторы

щих уровней амплитудной дискриминации в выбранных точках петли гистерезиса.

Прибор АФС-5 состоит из четырех основных блоков (см. рис. 17.13): блок генератора *I*; блок первичных преобразователей *II*; блок измерения параметров электромагнитных сигналов *III*; блок измерения параметров акустических сигналов *IV*. Блок генератора предназначен для питания перемагничивающей обмотки блока преобразователей периодическим линейно изменяющимся током и формирования строб-импульса длительностью θ . Принцип работы данного блока проиллюстрирован на рис. 17.14. Собственно генератор *I*, собранный на основе аналогового интегратора и прецизионного триггера, вырабатывает периодическое линейно изменяющееся напряжение $u(t)$, частоту изменения f которого можно регулировать, изменяя постоянную времени интегратора. Треугольное напряжение с генератора подается на усилитель мощности 2, выходное напряжение которого запитывает перемагничивающую обмотку блока

преобразователей. Вследствие индуктивного характера нагрузки усилителя мощности между напряжением $u(t)$ и током в обмотке $i(t)$, соответствующим напряженности поля перемагничивания $H(t)$, имеется временной сдвиг Δt , значение которого зависит от частоты тока перемагничивания и от индуктивности системы преобразователь-образец.

Для устранения влияния Δt на результаты измерения текущих характеристик сигналов МШ и МАШ в приборе предусмотрено следующее. Формирователь строб-импульса запускается от напряжения на резисторе R , который последовательно соединен с перемагничивающей обмоткой блока преобразователей. Для этого сигнал с резистора R , синхронный с током в перемагничивающей обмотке $i(t)$, а следовательно, и с полем $H(t)$, подается на нуль-орган 3, на выходе которого формируется прямоугольное напряжение u_1 , и далее на вход ждущего мультивибратора 4, который по заднему фронту импульсов u_1 формирует импульсы u_2

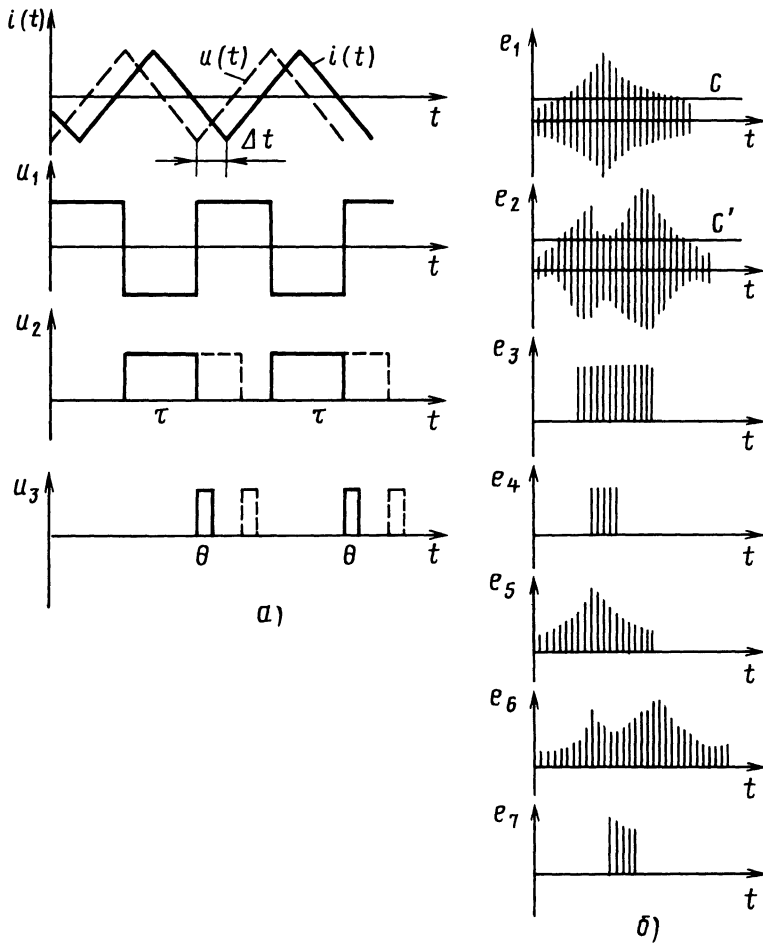


Рис. 17.14. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы блока генератора

длительностью τ . При этом τ изменяется от $T_n/4$ до $(3T_n/4) - \theta$, где $T_n = 1/f$ – период изменения намагничивающего поля, а θ – длительность строб-импульсов, которые формируются вторым ждущим мульти-вибратором 5 по заднему фронту импульсов u_2 . Изменяя длительность τ , можно изменять временное положение строб-импульса на полупериоде перемагничивания.

Прибор позволяет проводить измерение энергетических и эмиссионных текущих параметров сигналов МШ и МАШ в фиксированных точках петли гистерезиса.

17.4.2. Связь параметров огибающей сигналов магнитных шумов с уровнем микронапряжений

В ряде случаев сравнительную оценку уровней микронапряжений можно провести путем измерения твердости образцов, поскольку для углеродистых и конструкционных сталей характер изменения твердости и микронапряжений аналогичен.

На рис. 17.15 приведены зависимости твердости и показателя уровня микронапряжений – ширины рентгеновской линии 211 (α -Fe), полученной с помощью дифрактометра "Дрон-2,0", от температуры

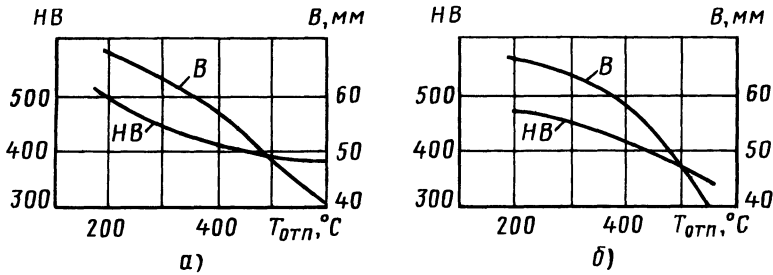


Рис. 17.15. Зависимости твердости HB и ширины рентгеновской линии B от температуры отпуска для сталей 33X3NM (а) и 30XГСН2А (б)

отпуска образцов из сталей 35X3NM и 30XГСН2А.

Параметры МШ регистрировали с использованием прибора АФС-5 с накладным преобразователем П-образного типа (режимы работы: частота тока перемагничивания 10 Гц, его амплитуда 0,6 А, интервал усреднения $0,025T_n$).

На рис. 17.16 показаны огибающие распределения МШ $e(t)$ для образцов из стали 30XГСН2А с различной термообработкой (см. табл. 17.1, группы 3.0 – 3.3). По рис. 17.15 и 17.16 видно, что с повышением температуры отпуска и снижени-

ем микронапряжений в стали максимум огибающей МШ E_{max} увеличивается, а его положение на периоде перемагничивания t_i/T_n смещается в область меньших полей старта СБ. Такая закономерность изменений параметров МШ имеет общий характер и наблюдалась для всех групп сталей, указанных в табл. 17.1. Уменьшение микронапряжений при повышении температуры отпуска связано со структурными изменениями в сталях (в основном с распадом мартенсита), что улучшает их магнитные свойства: уменьшает магнитную жесткость (коэрцитивную силу, смещает огибающую МШ $e(t)$ в область меньших полей старта СБ, увеличивает E_{max}).

Регистрация параметров ОМШ – максимального значения E_{max} и его положения t_i/T_n связана со значительным разбросом результатов измерений из-за случайного характера МШ. Поэтому для практических целей измеряют средневзвешенное значение МШ E , характер изменения которого идентичен характеру изменения E_{max} . Воспроизводимость результатов измерений параметра E в среднем в 2,5 раза выше воспроизводимости для параметра E_{max} и разброс не превышает 2 %. Соответственно, разрешающая способность прибора при контроле напряжений по параметру E составляет ≈ 5 МПа при доверительной вероятности 0,95 и несколько ниже, чем для параметра E_{max} (12 МПа).

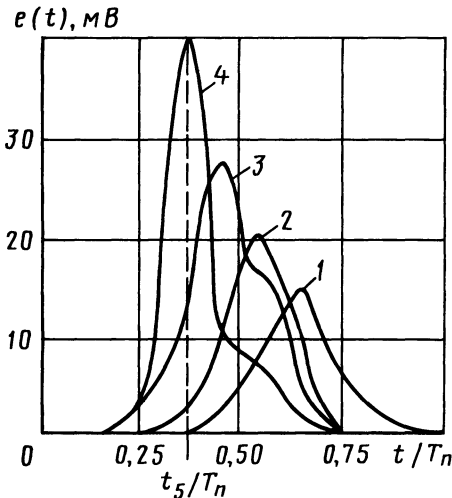


Рис. 17.16. Изменение огибающей МШ для образцов из стали 30XГСН2А после закалки с 900 °С (1), после закалки и отпуска при 180 (2), 360 (3) и 540 °С (4)

Для углеродистых сталей наблюдается обратная зависимость E и I_D от микронапряжений (твердости): при росте микронапряжений значение E однозначно падает.

Более сложный характер имеют процессы, происходящие при термообработке мартенситно-стареющей высокопрочной стали. Основным механизмом упрочнения этой стали является превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ в процессе закалки, что создает достаточно прочную и высокопластичную матрицу, которую в дальнейшем упрочняют старением. Старение мартенситно-стареющих сталей сопровождается изменением плотности дислокаций, уровня микронапряжений, периода решетки, фазового состава и, соответственно, исследуемых магнитных характеристик образцов.

Значительное повышение прочностных характеристик при старении происходит в результате перераспределения легирующих элементов в безуглеродистом мартенсите, что приводит к образованию зон концентрационной неоднородности и выделению высокодисперсных (≤ 20 нм) частиц интерметаллидных фаз. Старение мартенсита сопровождается увеличением предела текучести примерно в 2 раза, при этом характеристики пластичности и вязкости остаются достаточно высокими.

17.4.3. Зависимость параметров магнитных и магнитно-акустических шумов от уровня макронапряжений

В целях исследования зависимости параметров МШ и МАШ от значений макронапряжений при упругопластическом деформировании, а также влияния на эти параметры предварительной пластической деформации в экспериментах использовались две схемы нагружения образцов:

1) нагружение последовательно возрастающей растягивающей (сжимающей) нагрузкой;

2) нагружение по схеме нагрузка – разгрузка с последовательным увеличением растягивающей нагрузки.

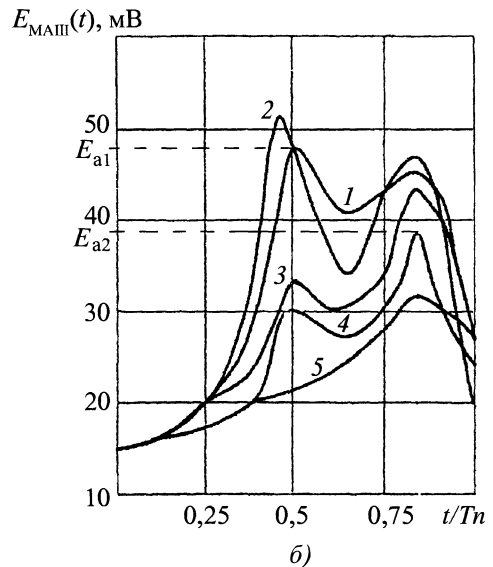
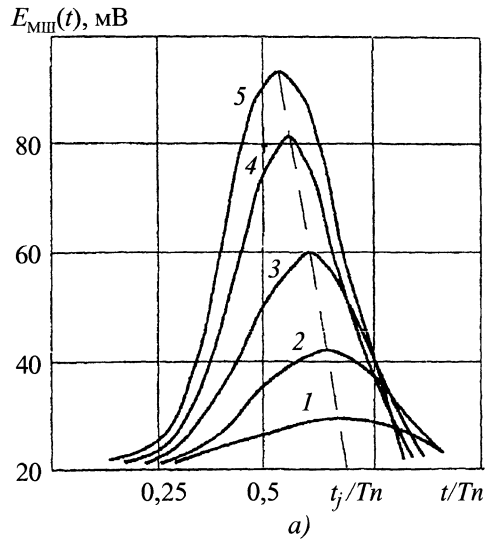


Рис. 17.17. Изменение огибающих МШ (а) и МАШ (б) для стали 60 при разных значениях приложенных напряжений σ_0 , МПа:

1 – 200; 2 – 0; 3 – 200; 4 – 400; 5 – 600

Сигналы МШ и МАШ регистрировались прибором типа АФС-5. Направление перемагничивания совпадало с направлением приложения нагрузки, тем самым обеспечивалась наибольшая чувствительность к приложенным напряжениям.

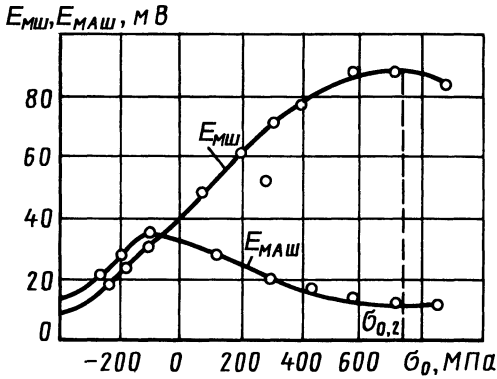


Рис. 17.18. Зависимости средних квадратических значений $E_{МШ}$ и $E_{МАШ}$ для стали 60 от упругих растягивающих и сжимающих напряжений

Влияние упругих одноосных напряжений. На рис. 17.17 приведены огибающие МШ и МАШ при разных значениях

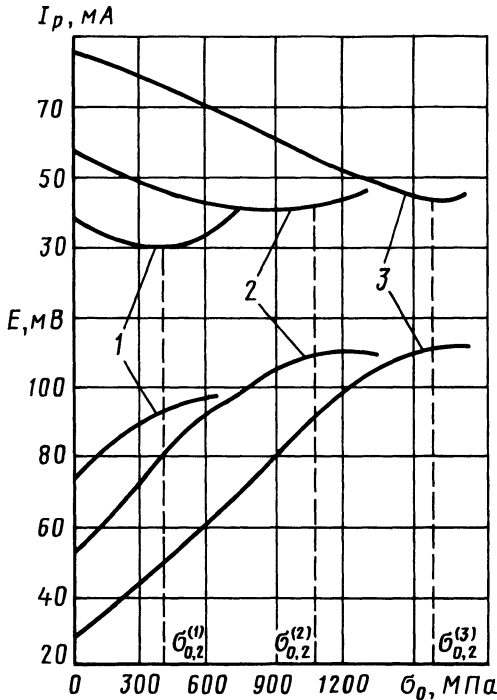


Рис. 17.19. Зависимости параметров I_p и E от растягивающих напряжений для образцов из стали 30ХГСН2А: 1 – НВ 209; 2 – НВ 348; 3 – НВ 467

приложенных упругих напряжений (по первой схеме нагружения) для образцов из стали 60 группы 5.2 (см. табл. 17.1), на рис. 17.18 – зависимости средних квадратических значений МШ $E_{МШ}$ и МАШ $E_{МАШ}$ от приложенных напряжений для той же стали.

Типичные огибающие МШ на рис. 17.17, а имеют один максимум E_{max} , который при увеличении растягивающих напряжений возрастает и его положение смещается в область меньших полей старта СБ. Среднее квадратическое значение МШ однозначно возрастает от сжимающих до растягивающих приложенных напряжений.

Деформация образца в направлении перематгничивания является одним из главных факторов, влияющих на параметры МШ. Это обстоятельство зарегистрировано многократно при нагружении плоских образцов одноосной нагрузкой, когда механические напряжения действуют только в направлении приложения нагрузки, в то время как деформации наблюдаются как вдоль, так и поперек оси. Эксперименты показали, что МШ (E) в направлении действия нагрузки (вдоль оси) возрастает при росте этой нагрузки и убывает в направлении, перпендикулярном к направлению действия нагрузки. Причем относительное изменение величины МШ при регистрации в образце поперек его оси нагружения составляет примерно 0,3 от такого же изменения при регистрации вдоль оси нагружения. Учитывая то, что при одноосном нагружении деформации вдоль и поперек оси нагружения связаны между собой коэффициентом Пуассона ν , значение которого близко к 0,3, можно сделать вывод, что именно деформация кристалла влияет на доменную структуру ферромагнетика и приводит к изменению параметров МШ. Причем упругие деформации растяжения в направлении перематгничивания приводят к возрастанию ЭДС, а деформации сжатия – к уменьшению ЭДС.

Типичные огибающие МАШ (см. рис. 17.17, б) имеют два максимума E_{a1} и E_{a2} , расположенных в областях полей перемагничивания, близких к насыщению ферромагнетика, причем первый максимум E_{a1} при увеличении упругих напряжений изменяется в 2-3 раза больше, чем второй. Характер зависимости среднего квадратического значения напряжения $E_{МАШ}$ от σ_0 (см. рис. 17.18) не однозначен: повышается от области сжимающих напряжений, а затем однозначно снижается.

Зависимости $E_{МШ}(\sigma_0)$ и $E_{МАШ}(\sigma_0)$ (см. рис. 17.17 и 17.18) в области упругих напряжений имеют общий характер для всех сталей, приведенных в табл. 17.2 и 17.3, независимо от их микроструктуры. При этом могут изменяться масштаб и крутизна зависимостей, перегиб максимума $E_{МАШ} = f(\sigma_0)$ может лежать в области как сжимающих, так и растягивающих напряжений.

Однозначный характер изменений характерных точек огибающей МШ (E_{\max} , t_f/T_n) от приложенных напряжений позволяют предположить возможность отдельной оценки уровня микро- и макронапряжений.

На рис. 17.19 приведены зависимости I_p и E от напряжений для образцов из стали 30ХГСН2А с разной твердостью. Зависимости, полученные для всех остальных исследованных марок углеродистой и легированной сталей, аналогичны по характеру и отличаются только абсолютными значениями измеряемых параметров.

Учитывая, что большинство деталей и изделий машиностроения работает в условиях действия нагрузок, не превышающих, как правило, $(0,5 \dots 0,7)\sigma_{0,2}$ (с коэффициентом прочности $2 \dots 3$), рассмотрим подробнее именно этот диапазон нагружения.

На рис. 17.20 представлены результаты измерений значений E и I_p при нагружении; штриховые линии соединяют точки, соответствующие одинаковым значениям растягивающих напряжений для об-

разца с разной твердостью. Необходимо отметить, что кривая для $\sigma_0 = 0$ соответствует полученной в п. 17.4.1, а графики, соответствующие напряжениям, отличным от нуля, являются эквидистантными по отношению к этой кривой, сохраняя при этом обратно пропорциональный характер.

Каждому сочетанию микро- и макронапряжений в материале соответствует своя точка в координатах амплитуда–поле максимума МШ (или $E - I_p$). Значения микро- и макронапряжений могут быть однозначно установлены по результатам измерений E и I_p . Для определения микронапряжений с учетом структурного состояния стали можно использовать параметр $P = EI_p$, где I_p – сила тока размагничивания при измерении коэрцитиметром.

На рис. 17.21 приведены зависимости параметра P от растягивающих напряжений в образцах из углеродистых и легированных сталей. Результаты статистической обработки экспериментальных данных, заключающейся в определении коэффициентов корреляции, уравнений линейной регрессии и доверительных интервалов, приведены в табл. 17.4.

Данные, представленные на рис. 17.21 и в табл. 17.4 (коэффициент корреляции во всех случаях превышает табличное значение $K_r = 0,349$ при доверительной вероятности 0,95), подтверждают возможность использования единой в пределах марки стали зависимости $P = f(\sigma_0)$ для контроля уровня макронапряжений углеродистых и легированных сталей.

Можно отметить две отличительные особенности, предопределяющие возможность первоочередной практической реализации МШ-метода при контроле макронапряжений в изделиях именно из этих сталей:

- 1) высокие прочностные характеристики и соответственно широкий диапазон линейных изменений E и I_p – до 1600 МПа;
- 2) малые изменения E и I_p , в рабочем интервале температур старения (до 500 °С).

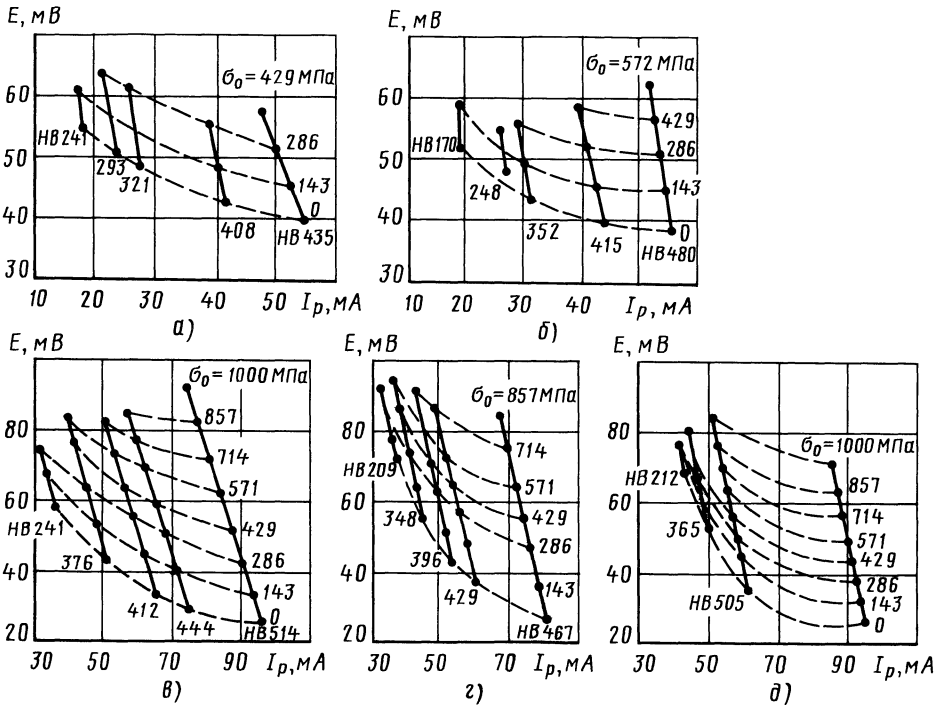


Рис. 17.20. Связь параметров E и I_p при нагружении образцов из стали марок 20 (а), 35 (б), 35X3NM (в), 30XГСН2А (г) и 45X1 (д)

Это позволяет при разработке средств контроля базироваться на известных схемотехнических решениях и информативных параметрах МШ, например E , учитывая при этом методические особенности контроля конкретных изделий.

Разработка аппаратуры, реализующей предложенные алгоритмы, должна обеспечивать:

- при использовании параметра P , пропорционального произведению E/I_p , возможность контроля макронапряжений по единой шкале в пределах марки стали;
- при использовании параметра P , пропорционального отношению E/I_p , повышение чувствительности контроля при решении задач тензометрии.

17.4. Результаты статистической обработки экспериментальных данных

Марка стали	Коэффициент корреляции K	Уравнение линейной регрессии	Доверительный интервал для σ , МПа
Сталь 20	0,487	$0,31P - 1572$	$\pm 0,61$
Сталь 35	0,511	$0,29P - 1441$	$\pm 0,56$
35X3NM	0,681	$0,19P - 460$	$\pm 0,37$
30XГСН2А	0,612	$0,56P - 1084$	$\pm 0,42$
45X1	0,432	$0,86P - 1522$	$\pm 0,89$

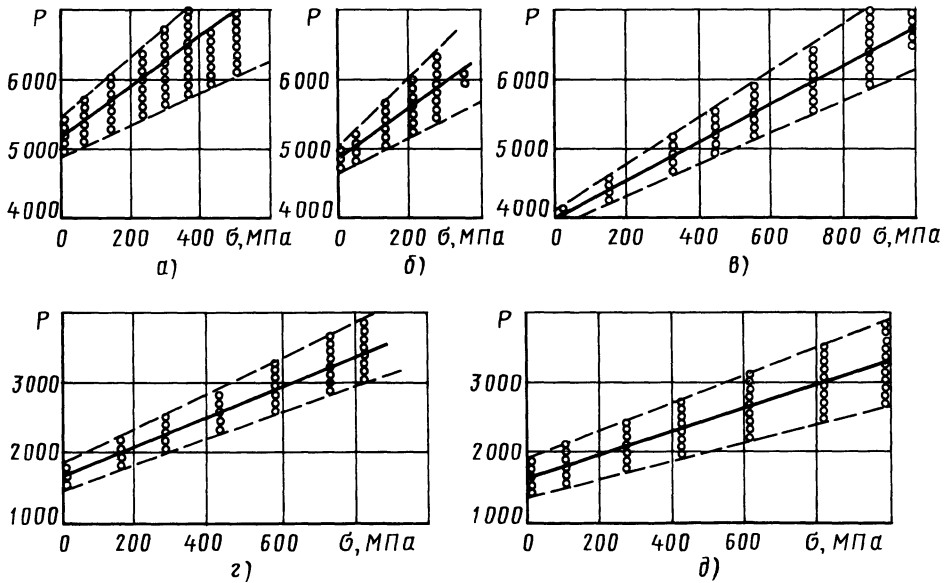


Рис. 17.21. Зависимость параметра P от растягивающих напряжений для стали разных марок:
 $a-d$ – то же, что и на рис. 17.20

Влияние пластических деформаций.
 В процессе эксплуатации изделий возможно кратковременное воздействие нагрузок, приводящих к микропластической деформации наиболее нагруженных узлов и деталей. Такая предварительная деформация может существенно сказаться на точности определения уровня макронапряжений по параметрам максимума огибающей МШ. Для оценки влияния на эти параметры предварительной пластической деформации образцов с различной структурой и определения диапазона растягивающих напряжений, в котором этим влиянием можно пренебречь, проведены исследования изменений параметров максимума огибающей МШ при нагружении по второй схеме (нагрузка–разгрузка).

На рис. 17.22 показаны характерные зависимости параметров E , I_p и остаточной деформации $\Delta l_{ост}$, измеренных при $\sigma = 0$ после воздействия предварительных растягивающих напряжений σ_0 , на примере

образцов из стали 30ХГСН2А (см. табл. 17.2) с сорбитной ($T_{зак} = 900$ °С, $T_{отп} = 540$ °С) и мартенситной ($T_{зак} = 900$ °С, $T_{отп} = 180$ °С) структурой.

Приведенные зависимости показывают, что для всех состояний предварительное нагружение сказывается начиная с напряжений $(0,6 \dots 0,8)\sigma_{0,2}$, в то время как характер изменений E и I_p для образцов со структурой сорбита и мартенсита различается.

В образцах со структурой сорбита процесс микро- и макропластической деформации сопровождается увеличением плотности дефектов кристаллического строения, в качестве которых выступают дислокации, что приводит к росту параметра σ_x и соответственно увеличению I_p и снижению E .

Обратный характер изменений E и I_p для образцов со структурой мартенсита можно объяснить тем, что пластическая деформация способствует структурно-

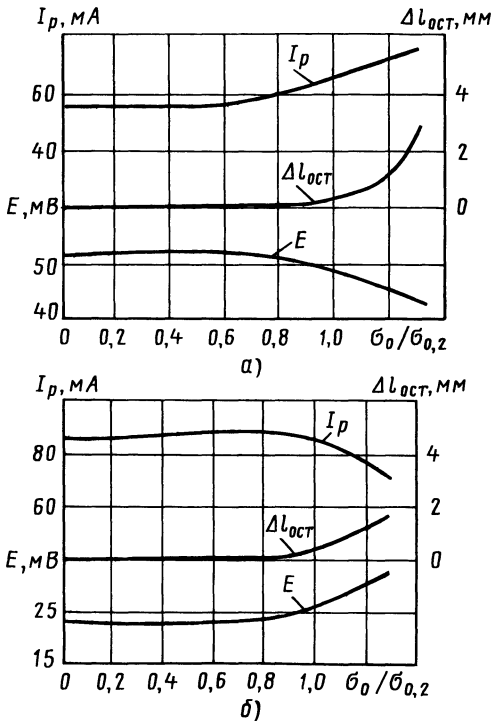


Рис. 17.22. Зависимости параметров I_p , E и остаточной деформации $\Delta l_{ост}$ от предварительной нагрузки для образцов из стали 30ХГСН2А с сорбитной (а) и мартенситной (б) структурой

фазовым превращениям, распаду мартенсита путем стимулирования образования новых дисперсных зародышей карбидов и ускорения их коагуляции. Образование частиц карбидов в результате пластической деформации благоприятно влияет на релаксацию внутризеренных макронапряжений. Процессы распада мартенсита и релаксации микронапряжений преобладает, по-видимому, над процессами увеличения плотности дефектов кристаллического строения и приводят к увеличению E и снижению I_p .

Одноосная пластическая деформация несколько нарушает обратно пропорциональный характер взаимосвязи величин E и I_p , поэтому после разгрузки координаты положения максимума отклоняются от кривой $E = f(I_p)$ при $\sigma = 0$. Эти отклонения связаны, по всей видимости, с возникно-

ванием остаточных сжимающих макронапряжений в поверхностном слое материала вследствие большей степени его деформации, а также с появлением наведенной анизотропии микронапряжений. Однако относительная погрешность определения параметра P в этом случае не превышает 5 %, а результаты контроля макронапряжений предварительно нагруженных образцов не выходят за границы соответствующих доверительных интервалов.

При больших пластических деформациях обратный характер зависимости энергетических характеристик сохраняется, однако ввиду того, что $P \neq const$, этот параметр не может использоваться в этом случае.

17.4.4. Исследование влияния поверхностного пластического деформирования на параметры магнитных шумов

При поверхностном пластическом деформировании (ППД) металлоизделий происходит изменение напряжений в поверхностных слоях, которое можно контролировать с использованием параметров МШ.

На рис. 17.23 приведены огибающие МШ $e(t)$ при разных режимах упрочнения дробью стали 30ХГСН2А с сорбитной и мартенситной структурой; штриховые линии соответствуют неупрочненному образцу.

В практических условиях технологической обработки ППД не удастся создать щадящий режим подготовки поверхности металлоизделий. Технологическая предыстория искажает однозначный характер изменения параметров МШ при ППД и затрудняет использование для контроля характерных точек огибающих МШ, таких как E_{max} и t_j/T_n .

Маршрут их технологической обработки, согласно реальной технологии, включает следующие операции: термообработка (закалка от 900 °С в масле, отпуск при 200 °С); шлифование рабочей поверхности; упрочнение ППД.

17.5. Форма образцов и вид поверхностной обработки

Форма образцов	Сталь	Вид обработки	Номер группы
Цилиндрическая: $d = 12 \text{ мм}, l = 140 \text{ мм}$	30ХГСН2А, 45НГН2МФА-Ш	Обработка дробью	1
		Алмазное выглаживание	2
		Накатывание роликами	3
Цилиндрическая с гал- тельным переходом: $d_1 = 13,5 \text{ мм}, l_1 = 130 \text{ мм};$ $d_2 = 6,5 \text{ мм}, l_2 = 50 \text{ мм}$	30ХГСН2А	Алмазное выглаживание	4
		Обработка дробью	5
Цилиндрическая с гал- тельным переходом: $d_1 = 17 \text{ мм}, l_1 = 220 \text{ мм};$ $d_2 = 7,5 \text{ мм}, l_2 = 50 \text{ мм}$	30ХГСН2А	Алмазное выглаживание	6

В качестве ППД используют алмазное выглаживание инструментом типа АСПК-3, обработку дробью с помощью приспособления пистолетного типа, накатывание роликами (табл. 17.5).

Основными параметрами процесса выглаживания, наиболее сильно влияющими на качество поверхностного слоя, являются сила выглаживания (накатывания) P_v , радиус алмазного наконечника R и продольная подача инструмента S . При исследовании процесса дробеструйной обработки рассматривались диаметр дроби D , давление воздуха p , продолжительность обработки τ и число загружаемых в приспособление шариков n .

Остаточные напряжения в образцах определяют с помощью рентгеноструктурного анализа и методом травления. Рентгенограммы записывались на дифрактометре ДРОН-2 с использованием дифракционных линий основного материала (200) и эталонного вольфрама (300). Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя определялось путем последовательного удаления напряженных слоев электролитическим травлением с помощью прибора ПИОН-3. Электролитом служил раствор серной и ортофосфорной кислот. При определении параметров поверхностных слоев изделий

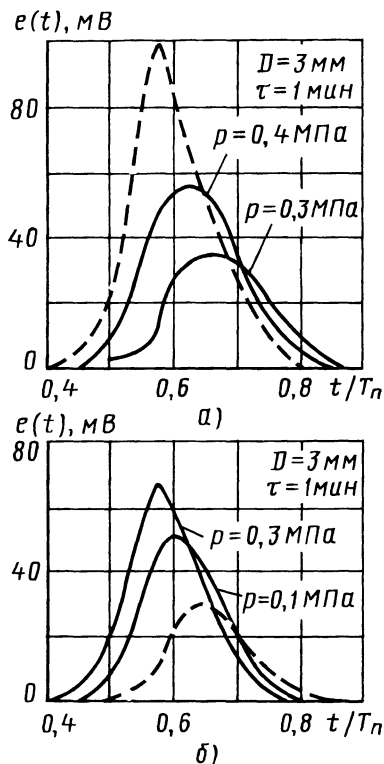


Рис. 17.23. Изменение огибающей МШ для образцов из стали 30ХГСН2А с сорбитной (а) и мартенситной (б) структурой при разных режимах упрочнения дробью (диаметр $D = 3 \text{ мм}$; продолжительность $\tau = 1 \text{ мин}$; p – давление воздуха в упрочняющем механизме)

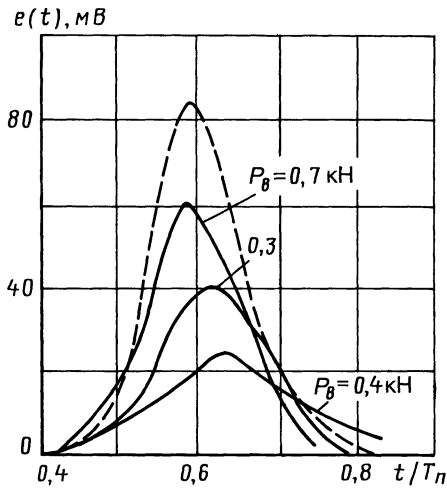


Рис. 17.24. Распределение $e(t)$ для образцов из стали 45ХН2МФА группы 3 до ППД (штриховая линия) и после накатывания роликом с усилием P_θ (сплошные линии)

использовались данные параллельных испытаний не менее трех образцов.

Контроль качества упрочнения состоит из двух основных этапов. На первом этапе проводят экспериментальные исследования, целью которых является анализ статистической связи между параметрами МШ и объекта контроля. Полученные для ряда значений контролируемого параметра распределения параметров МШ $N(C, t)$

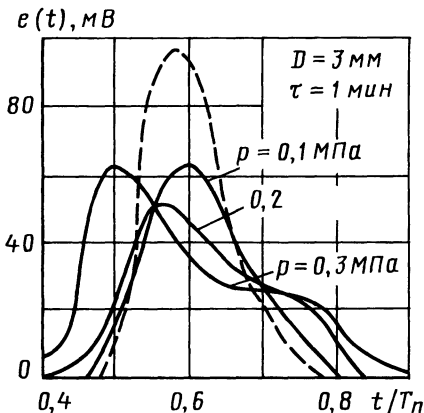


Рис. 17.25. Распределение $e(t)$ для образцов группы 1 до ППД (штриховая линия) и после упрочнения при разных значениях давления p (сплошные линии)

и $e(t)$ дают возможность выбрать информативные параметры, в наибольшей степени удовлетворяющие требованиям контроля – однозначности, линейности, наибольшей чувствительности. На втором этапе показаниям прибора АФС, согласно градуировочной зависимости, ставится в соответствие значение контролируемого параметра.

При использовании в целях контроля текущих характеристик ЭДС СБ методика построения градуировочной зависимости сводится к выбору оптимального положения строб-импульса t_i , которое в дальнейшем при контроле однотипных изделий остается неизменным.

Поиск оптимального значения t_i и построение градуировочных зависимостей осуществляли с использованием аппарата корреляционного и регрессионного анализа.

На рис. 17.24–17.26 приведены распределения текущих параметров МШ при изменении степени деформации ППД образцов групп 1 и 3 (см. табл. 17.5). Энергетические характеристики МШ $e(t)$ в зависимости от степени деформации изменяются неоднозначно (рис. 17.24 и 17.25).

Эмиссионные характеристики МШ однозначно определяются степенью деформации (см. рис. 17.24), причем, несмотря на снижение мощности сигнала (см. рис. 17.25) и соответственно увеличенное относительное уровня селекции, число выбросов в целом возрастает. Сравнительный анализ кривых на рис. 17.26 дает основание предполагать, что в формирование данного информативного параметра преобладающий вклад вносит перестройка доменной структуры.

Сложный характер изменения характеристик МШ не позволяет использовать для контроля средние параметры. В то же время на каждом из вышеприведенных рисунков можно выбрать участок на петле гистерезиса (t_i/T_n) (см. рис. 17.24), на котором измеряемый параметр с увеличением степени деформации изменяется моно-

тонно. Это подтверждает целесообразность использования в качестве информативных параметров текущих характеристик МШ.

Алмазное выглаживание приводит к созданию текстуры поверхностных слоев. Текстура является причиной анизотропии магнитных свойств. Анизотропия будет усиливаться и возникающими в результате ППД остаточными напряжениями 1-го рода, так как уровень напряжений, направленных вдоль движения упрочняющего тела, значительно меньше напряжений, перпендикулярных к направлению выглаживания. Поэтому следует ожидать, что характер влияния ППД на параметры МШ будет во многом определяться направлением перемагничивания изделия.

Рис. 17.27–17.29 отражают влияние степени деформации на число выбросов МШ. Результаты получены при перемагничивании образцов групп 1 и 3 поперек направления выглаживания. Видно, что параметры МШ однозначно зависят от степени деформации. Определяющим фактором при перемагничивании упрочненных изделий поперек направления обработки является влияние остаточных напряжений 1-го рода.

Более детальный анализ данных показывает, что моменты времени, соответствующие экспериментальным значениям МШ, с увеличением степени деформации изменяются неоднозначно. Указанные моменты могут иметь разные значения и тенденции изменения в распределениях $N(C, t)$ и $e(t)$. По мере увеличения уровня селекции положение экстремального значения $N(C, t)$ перемещается от момента, соответствующего числу пересечений с нулевым уровнем, к моменту максимального значения параметра МШ.

Для контроля качества ППД наиболее целесообразно использовать текущие характеристики МШ. При контроле степени алмазного выглаживания в некоторых случаях можно применять средние значения параметров МШ.

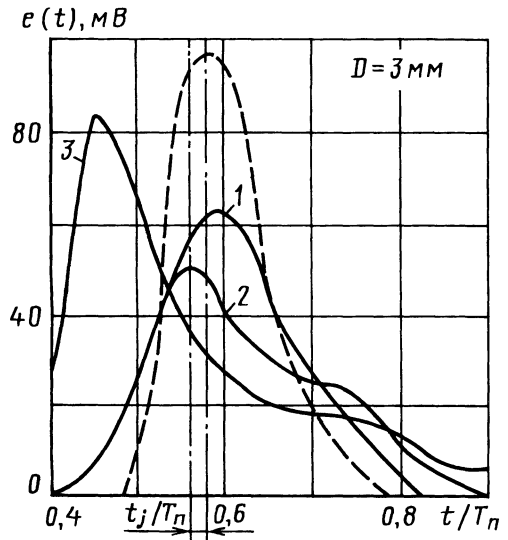


Рис. 17.26. Распределение $e(t)$ для образцов группы 1 до ППД (штриховая линия) и после упрочнения (сплошные линии):
1 – $p = 0,1$ МПа; $\tau = 1$ мин; 2 – $p = 0,2$ МПа; $\tau = 2$ мин; 3 – $p = 0,3$ МПа; $\tau = 3$ мин

Естественная избирательная чувствительность МШ к изменению физико-механических свойств в поверхностных слоях делает метод эффекта Баркгаузена

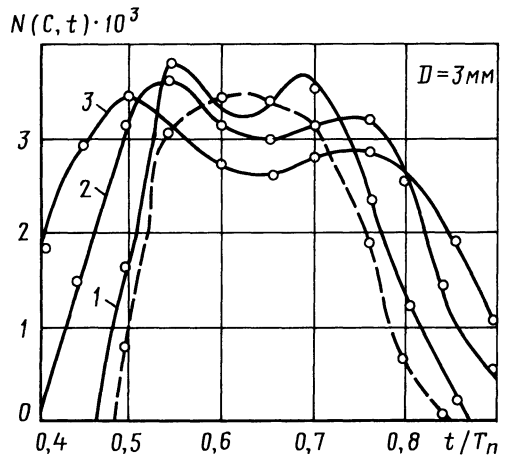


Рис. 17.27. Распределение числа выбросов МШ для образцов группы 1 до ППД (штриховая линия) и после упрочнения (сплошные линии):
1–3 – то же, что и на рис. 17.26

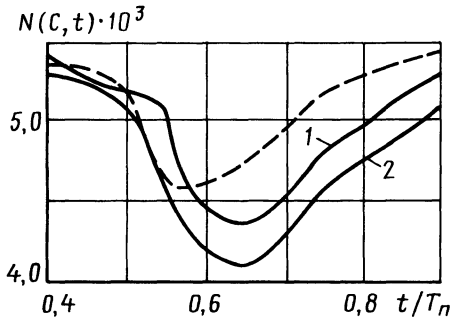


Рис. 17.28. Распределение $N(C, t)$ для образцов группы 3 до ППД (штриховая линия) и после упрочнения (сплошные линии):

1 – $p = 0,1$ МПа; $\tau = 3,5$ мин, $S = 0,1$ мм/об;
2 – $p = 0,3$ МПа; $\tau = 1,5$ мин, $S = 0,05$ мм/об

перспективным при контроле ППД. Неоднозначность изменений параметров МШ в условиях ППД приводит к необходимости использовать при контроле текущих энергетических и эмиссионных характеристик МШ с применением методов временной и амплитудной селекции и методов регрессионного и корреляционного анализа.

Режимы упрочнения при ППД в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств изделий можно варьировать в широких пределах. Установление связи параметров МШ с технологическими факто-

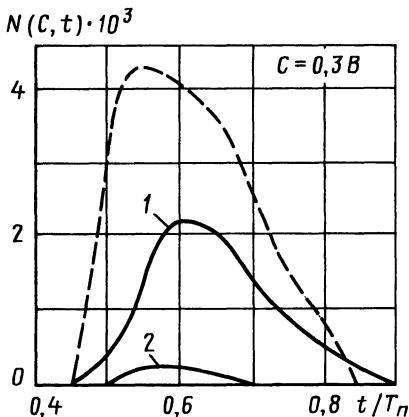


Рис. 17.29. Распределение $N(C, t)$ для образцов группы 3 до ППД (штриховая линия) и после упрочнения (сплошные линии):

1, 2 – то же, что и на рис. 17.28

рами упрочнения позволило бы по результатам неразрушающего контроля проводить корректировку режимов упрочнения и тем самым активно воздействовать на процесс изготовления изделий.

При упрочнении дробью целесообразно контролировать продолжительность ППД τ и давление воздуха в упрочняющем устройстве p . Эти параметры определяют значение контактного давления и число повторных деформаций. Ранее установлено, что зависимость средних характеристик МШ прибора АФС от степени деформации дробью не является однозначной. Переход к текущим характеристикам позволяет получить монотонные зависимости информативных параметров МШ от факторов ППД.

Разработаны следующие регрессионные модели:

$$e(t_j/T_n = 0,6) = 44,23 - 90,98p - 4,87\tau - 0,57 \cdot 10^{-2}Dn + 25,38P\tau + 0,036P_B + 0,58D^2 - 2,05D\tau;$$

$$N(t_j/T_n = 0,6) = 276,82 - 0,56P_B + 64,95p\tau + 7,42D^2 + 0,13n - 28,22\tau - 104,57pD + 722,60p^2;$$

$$N(t_j/T_n = 0,45) = -2735,16p^2 + 0,4pn + 78,12p\tau - 0,21n + 1898,26p - 9,99D^2 + 6,3D\tau.$$

Результаты регрессионного моделирования приведены на рис. 17.30 и 17.31; штриховыми линиями отмечены границы доверительных интервалов. Они показывают, что контроль режимов упрочнения возможен по текущим параметрам как энергетических, так и эмиссионных характеристик МШ. Выбирая участок анализа t_j , можно получить различный характер зависимостей. Сравнительный анализ использования аналоговых и дискретных характеристик позволяет сделать вывод о предпочтительности применения в целях контроля параметра $N(C, t_j)$. Принцип изменения уровня селекции C делает данный параметр более гибким. Так, при повышении относительного уровня селекции C^*

(для $t_j/T_n = 0,45$ больше, чем для $t_j/T_n = 0,6$) достигается большая чувствительность к контролируемому параметру. Однако при этом возрастает погрешность измерения $N(C, t)$. Это, в свою очередь, снижает точность контроля. Очевидно, что при задании уровня селекции необходим разумный компромисс.

Наиболее эффективным является контроль параметров, определяющих значение контактного давления (p, D). При контроле продолжительности упрочнения τ чувствительность снижается. Нетрудно также заметить, что с увеличением степени деформации крутизна характеристик изменяется.

Представленные результаты не отражают исходное неупрочненное состояние изделий, определяемое технологической наследственностью. В связи с этим следует отметить, что различие в значениях параметров МШ для упрочненного и неупрочненного образцов является существенным.

Результаты исследований по упрочнению алмазным выглаживанием, полученные при перемагничивании образцов группы 3 ($f = 1$ Гц, $H_m = 6$ кА/м), позволили разработать регрессионные модели, часть которых приведена ниже:

$$N(t_j/T_n = 0,7) = 41,46R - 117,50P_B R + 92,48SR + 2\,120,00 P_B^2 - 968,25P_B + 98,80;$$

$$N_{сд} = 100,97R - 11,25R^2 - 0,02 P_B R + 0,33 \cdot 10^{-4} P_B^2 - 0,103P_B + 225,52SR - 0,19P_B S.$$

Данные модели иллюстрируются зависимостями, приведенными на рис. 17.32 и 17.33; штриховыми линиями показаны границы доверительных интервалов. Монотонный характер изменения представленных кривых определяет возможность контроля режимов алмазного выглаживания методом ЭБ. Примечательно, что, как и в рассмотренном выше случае, увеличение степени деформации приводит к ста-

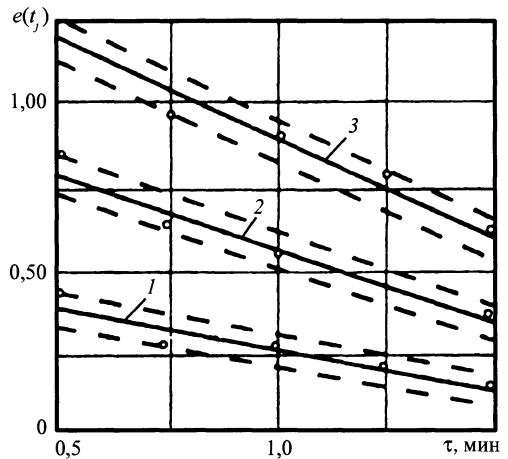


Рис. 17.30. Зависимость параметра $e(t_j)$ от продолжительности упрочнения ($\tau/T_n = 0,6$; $D = 3$ мм; $n = 400$) при $p = 0,1$ (1), $0,2$ (2) и $0,3$ МПа (3)

билизации параметров МШ. Данный факт в определенной мере может служить критерием достижения цели упрочнения.

Методика контроля режимов упрочнения с помощью регрессионных моделей предполагает решение обратной задачи, т.е. получение зависимостей контролируемого технологического параметра, например $p = p[D, n, \tau, N(C, t)]$, $P_B = P_B[R, S, N(C, t)]$ и т.п. Другой путь заключается в использовании графического отображения регрессионных моделей. Коэффициенты корреляции и корреляционные отношения полученных зависимостей находятся в пределах $0,65 \dots 0,97$, поэтому их можно применить в качестве градуировочных при организации неразрушающего контроля режимов упрочнения изделий из стали 30ХГСН2А.

Формирование уровня остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое изделий определяется взаимным сочетанием технологических факторов ППД. Ряд эпюр остаточных напряжений, полученных при упрочнении образцов группы 1 (см. табл. 17.5), приведен на рис. 17.34. Представленные эпюры можно с достаточной точностью описать следующими параметрами: остаточные на-

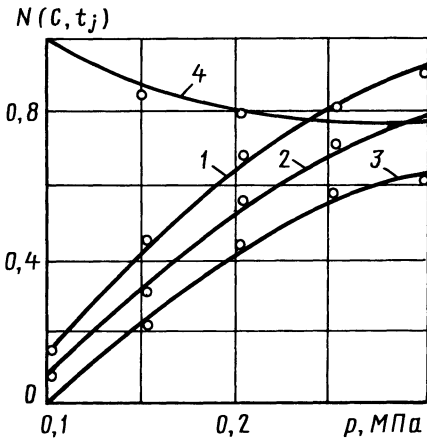


Рис. 17.31. Зависимость параметра $N(C, t_j)$ от давления воздуха p в упрочняющем механизме:

- 1 - $t_j/T_n = 0,45$, $\tau = 1,5$ мин, $D = 3$ мм, $n = 400$;
 2 - $t_j/T_n = 0,45$, $\tau = 0,5$ мин, $D = 3$ мм, $n = 400$;
 3 - $t_j/T_n = 0,45$, $\tau = 0,5$ мин, $D = 4$ мм, $n = 80$;
 4 - $t_j/T_n = 0,6$, $\tau = 0,5$ мин, $D = 3$ мм, $n = 400$

пряжения на поверхности σ_0 , максимальное значение остаточных напряжений σ_{\max} , глубина упрочнения по напряжениям h_n и глубина залегания максимальных остаточных напряжений $h_{\sigma \max}$.

Для установления корреляции параметров МШ с элементами эпюры остаточ-

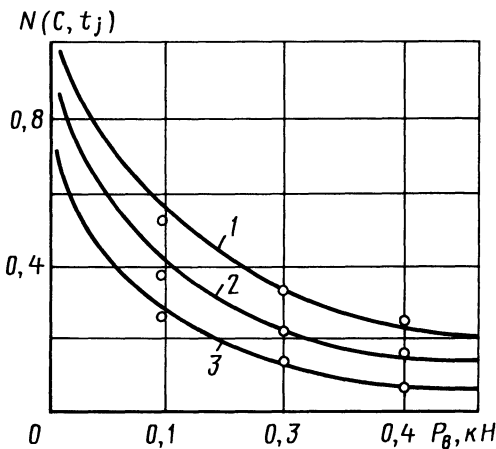


Рис. 17.32. Зависимость параметра $N(C, t_j)$ от усилия выглаживания P_g ($C = 0,3$ В, $S = 0,1$ мм/об) при разных значениях R , мм: 1 - 3,5; 2 - 2,5; 3 - 1,5

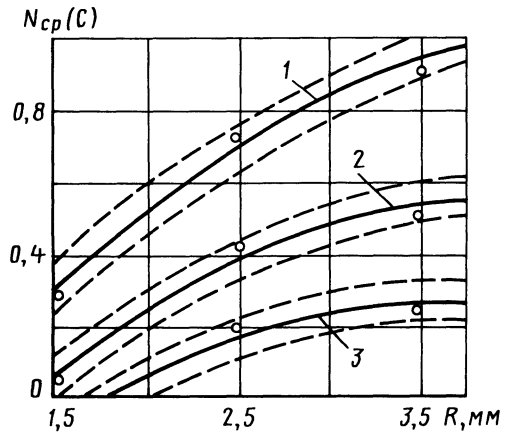


Рис. 17.33. Зависимость значения $N_{cp}(C)$ от радиуса алмазного наконечника R ($C = 0,7$ В; $S = 0,1$ мм/об) при разных значениях P_B , кН: 1 - 0,10; 2 - 0,15; 3 - 0,20

ных напряжений проведены исследования, результаты которых представлены на рис. 17.35–17.40. В табл. 17.6 приведены регрессионные уравнения, а также значения коэффициентов корреляции и корреляционных отношений. Экспериментальные данные получены при перемагничивании образцов магнитным полем с частотой $f = 1$ Гц и амплитудами $H_m = 3$ кА/м (образцы группы 1), $H_m = 6$ кА/м (образцы 2, 3), $H_m = 9$ кА/м (образцы 4, 5) при различных значениях

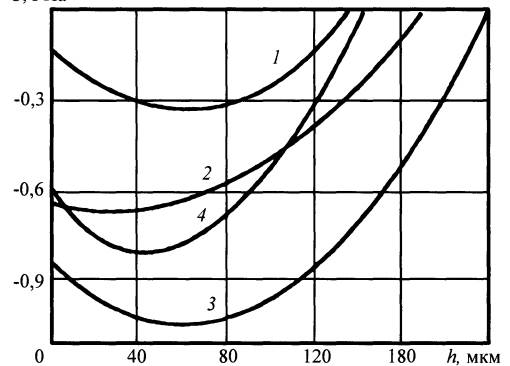


Рис. 17.34. Эпюры остаточных напряжений для образцов группы 1:

- 1 - $D = 3$ мм, $p = 0,1$ МПа, $\tau = 0,5$ мин, $n = 400$;
 2 - $D = 3$ мм, $p = 0,1$ МПа, $\tau = 1,5$ мин, $n = 400$;
 3 - $D = 3$ мм, $p = 0,3$ МПа, $\tau = 1$ мин, $n = 400$;
 4 - $D = 3$ мм, $p = 0,1$ МПа, $\tau = 1,5$ мин, $n = 740$

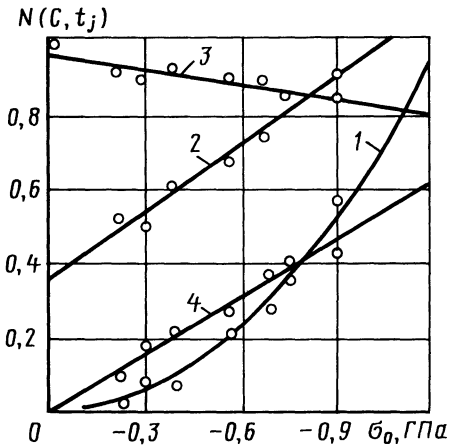


Рис. 17.35. Зависимость параметра $N(C, t_j)$ от остаточных напряжений на поверхности при $t_j/T_n = 0,45$ (1), 0,50 (2), 0,65 (3) и 0,85 (4)

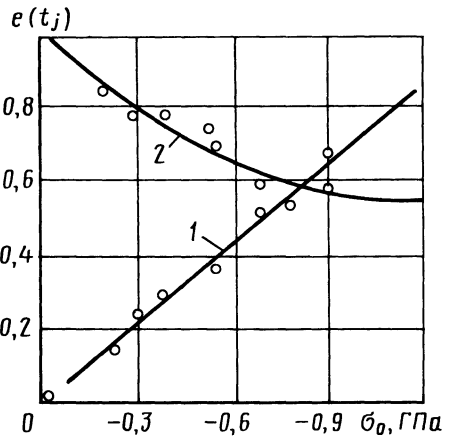


Рис. 17.36. Зависимость параметра $e(t_j)$ от остаточных напряжений на поверхности при $t_j/T_n = 0,5$ (1) и 0,6 (2)

группы 2); уровень селекции составлял 0,3 В.

Анализ результатов (см. рис. 17.35–17.40) показывает, что контроль параметров поверхностных слоев возможен как по аналоговым, так и по частотным характеристикам МШ. Выбор уровня селекции и положения измеряемого участка t_j позволяет получить зависимости с различной степенью крутизны и линейности. Так, по рис. 17.35 видно, что наибольшей чувствительности соответствуют участки, расположенные на краях реализации МШ. Это обусловлено различием в значениях относительного уровня селекции (кривая 3 соответствует участку анализа с наименьшим значением C^*).

При упрочнении изделий дробью контроль остаточных напряжений σ_0 и σ_{max} наиболее эффективен. Сходный характер зависимостей на рис. 17.35 и 17.37 указывает на то, что изменение параметров МШ определяется общим уровнем остаточных напряжений. Кроме того, в большинстве случаев значения σ_0 и σ_{max} незначительно отличаются друг от друга.

Глубина упрочнения по напряжениям h_n резко изменяется относительно исходного, неупрочненного состояния, но далее при увеличении степени деформации ста-

билизируется. Это находит отражение в результатах контроля (см. рис. 17.38). В пользу стабилизации параметров МШ свидетельствует также тот факт, что влияние остаточных напряжений становится слабее с увеличением глубины рассматриваемого поверхностного слоя.

Анализ эпюр остаточных напряжений показывает, что глубина залегания максимальных остаточных напряжений при увеличении степени деформации изменяется сложным образом, поэтому однозначной

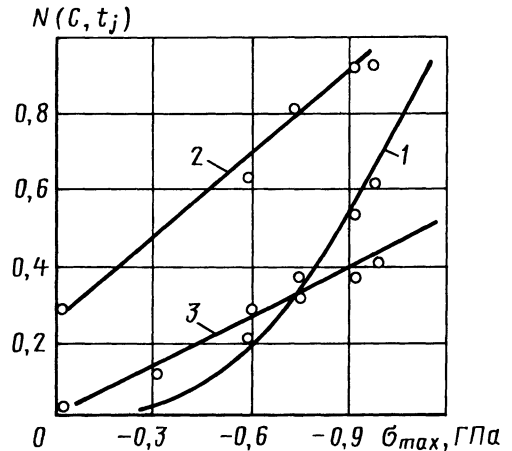


Рис. 17.37. Зависимость параметра $N(C, t_j)$ от максимальных остаточных напряжений при $t_j/T_n = 0,45$ (1), 0,50 (2) и 0,85 (3)

17.6. Результаты регрессионного и корреляционного анализа

Номера рисунка и кривой	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Корреляционное отношение
Рис. 17.35:			
1	$228,96 \sigma_0^2$	0,69	0,79
2	$128,36 - 204,07 \sigma_0$	0,86	0,86
3	$339,29 + 47,22 \sigma_0$	-0,95	0,95
4	$-169,97 \sigma_0$	0,9	0,9
Рис. 17.36:			
1	$-24,84 \sigma_0$	0,98	0,98
2	$36,16 + 31,59 \sigma_0 + 14,78 \sigma_0^2$	-0,86	0,94
Рис. 17.37:			
1	$89,46 \sigma_{\max} + 337,19 \sigma_{\max}^2$	0,72	0,83
2	$85,70 - 258,50 \sigma_{\max}^2$	0,88	0,88
3	$-153,44 \sigma_{\max}$	0,83	0,83
Рис. 17.38:			
1	$167,95 - 1,14 h_{\text{н}} +$ $+ 25,57 \cdot 10^{-4} h_{\text{н}}^2$	-0,75	0,86
2	$120,67 - 0,66 h_{\text{н}} +$ $+ 12,89 \cdot 10^{-4} h_{\text{н}}^2$		
Рис. 17.39:			
1	$228,73 + 125,94 \sigma_{\text{ос}}$	-0,87	0,87
2	$70,34 + 40,04 \sigma_{\text{ос}}$	-0,84	0,84
Рис. 17.40:			
1	$804,72 - 296,67 \sigma_{\text{ос}}^2$	-0,83	0,93
2	$127,36 + 37,48 \sigma_{\text{ос}}$	-0,74	0,74

$$\sigma = 185,86 - (4,68 - 4,49 \cdot 10^{-2} h + 3,49 \cdot 10^{-2} N_{0,45} - 4,58 \cdot 10^{-2} N_{0,85})h - (12,66 - 0,12 N_{0,45} + 2,95 \times 10^{-2} N_{0,85})N_{0,85} - 6,16 \cdot 10^{-2} N_{0,45}^2.$$

зависимости параметров $N(C, t_i)$ и $e(t_i)$ от глубины $h_{\sigma_{\max}}$ установить не удалось.

При упрочнении изделий алмазным выглаживанием (образцы группы 2 из табл. 17.5) наибольшее влияние на эксплуатационные свойства, например сопротивление и усталостную прочность, оказывают осевые остаточные напряжения

$\sigma_{\text{ос}}$, перпендикулярные к направлению движения алмазного инструмента. В силу этого значение $\sigma_{\text{ос}}$ может служить критерием качества ППД. Зависимости на рис. 17.39 и 17.40 свидетельствуют о возможности оценки напряжений $\sigma_{\text{ос}}$ по текущим и средним значениям параметров МШ.

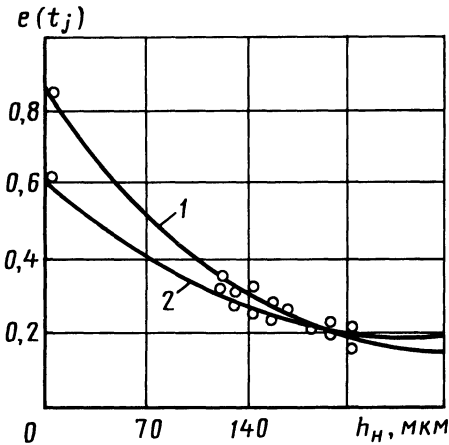


Рис. 17.38. Зависимость параметра $e(t_j)$ от глубины упрочнения по напряжениям при $t_j/T_n = 0,65$ (1) и $0,70$ (2)

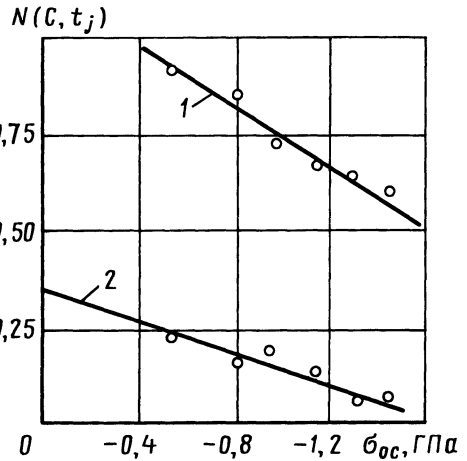


Рис. 17.39. Зависимость параметра $N(C, t_j)$ от осевых остаточных напряжений при $t_j/T_n = 0,6$ (1) и $0,8$ (2)

Представляет интерес восстановление с помощью параметров МШ полной эпюры остаточных напряжений. Решение этой задачи позволило бы с большей достоверностью прогнозировать свойства поверхностных слоев металла. Регрессионный анализ позволил разработать модель зависимости остаточных напряжений от глубины поверхностного слоя и параметров МШ. Для достижения высокой адекватности модели экспериментальным данным в качестве аргументов приняты значения числа выбросов на двух участках усреднения $t_j/T_n = 0,45$ и $0,85$. Аппаратурная реализация одновременного использования двух параметров МШ осуществляется с помощью двух мультивибраторов, вырабатывающих стробирующие импульсы, сдвинутые один относительно другого на заданный интервал времени.

Вид модели приведен в табл. 17.6. Графическое отображение результатов представлено на рис. 17.41, где сплошными линиями показаны расчетные эпюры, а штриховыми – реальные. Видно, что результаты регрессионного моделирования могут быть использованы для оценки распределения остаточных напряжений по глубине.

Значения коэффициентов корреляции и корреляционных отношений (см.

табл. 17.7) определяют возможность НК параметров поверхностных слоев изделий из стали 30ХГСН2А. Регрессионные зависимости при этом можно использовать в качестве градуировочных. Разнообразие зависимостей между информативными и контролируемыми параметрами можно существенно расширить при изменении режима перематригивания и условий обработки регистрируемого сигнала. В частности, при изменении текущих характеристик МШ оптимальные градуировочные

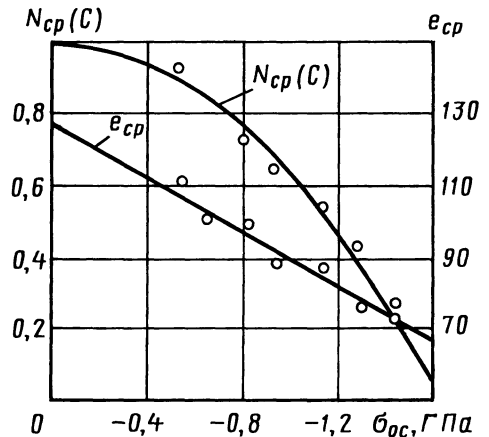


Рис. 17.40. Зависимости параметров $N_{cp}(C)$ и e_{cp} от осевых остаточных напряжений

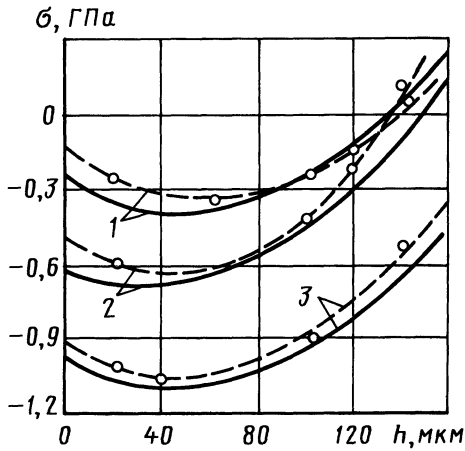


Рис. 17.41. Эпюры остаточных напряжений:
 1 — $p = 0,1$ МПа, $\tau = 0,5$ мин, $D = 3$ мм, $n = 400$;
 2 — $p = 0,1$ МПа, $\tau = 1$ мин, $D = 3$ мм, $n = 400$;
 3 — $p = 0,3$ МПа, $\tau = 1,5$ мин, $D = 2$ мм, $n = 740$

зависимости можно получить путем регулирования уровня селекции, длительности интервала усреднения и его положения на периоде нестационарности. Перспективным является также одновременное использование нескольких параметров, соответствующих разным участкам интервала существования МШ. Определенный эффект может быть достигнут при одновременном использовании эмиссионных и энергетических характеристик МШ.

17.4.5. Сравнительный анализ параметров магнитных и магнитно-акустических шумов и разработка алгоритмов контроля на основе их совместного использования

Физическое различие сигналов МШ и МАШ предполагает особенности их использования для целей НК как отдельно, так и совместно. Сигналы МШ носят избирательный характер и чувствительны к физико-механическим процессам в поверхностных слоях металлоизделий (до 0,6 мм). Сигналы МАШ носят интегральный характер и регистрируются со всего объема перемагничивания.

На рис. 17.42 показаны кривые относительного изменения сигналов МШ и МАШ при разных способах нагружения; E_0 соответствует ненагруженному состоянию образца. Видно, что относительное изменение $E_{\text{МШ}}/E_{0\text{МШ}}$ при растяжении и изгибе имеет подобный характер и возрастает с увеличением растягивающих напряжений. Увеличение этого отношения при изгибе несколько меньше, так как искривление поверхности уменьшает пятно контакта между накладным преобразователем и образцом. Характер изменений сигналов МАШ при растяжении и изгибе различен. Изгиб создает неоднородное напряжение, при котором напряжения изменяются по толщине детали от $+\sigma_{\text{max}}$ до $-\sigma_{\text{max}}$. Поэтому противоположное влияние сжимающих и растягивающих механических напряжений оказывает интегральное воздействие на величину сигналов МАШ, что выражается в незначительном их увеличении.

Преимуществом использования сигналов МАШ является возможность регистрации сигналов на расстоянии от зоны контроля. Экспериментальное подтверждение было получено при исследовании затухания сигналов МШ и МАШ в образце прямоугольного сечения 50×10 мм, длиной 700 мм из стали 45X1. Конец образца перемагничивался приставным электромагнитом.

Индукционный и пьезоэлектрический преобразователи постепенно удаляли от зоны перемагничивания к противоположному концу образца и в каждой точке измеряли средние значения акустических и электромагнитных сигналов.

По результатам измерений, представленным на рис. 17.43, видно, что сигналы МШ затухают уже на первых 50 мм. При удалении пьезоэлектрического преобразователя на противоположный от электромагнитного конец балки средние значения сигналов МАШ уменьшились лишь на 21 %. Слабое затухание сигналов МАШ можно объяснить малым значением коэффициента поглощения ультразвука в сталях. Это дает преимущество методу с использова-

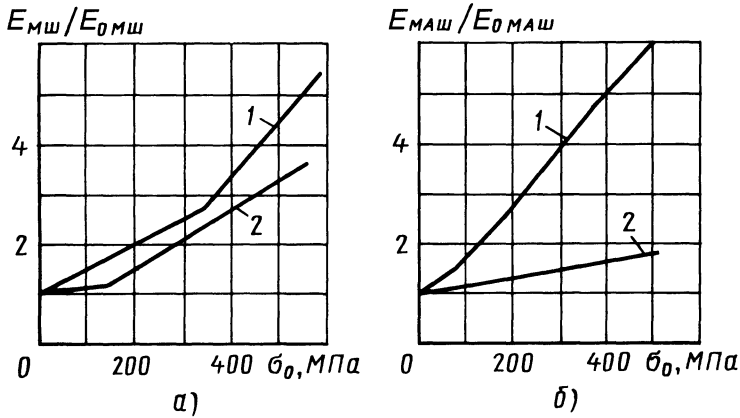


Рис. 17.42. Зависимость относительного изменения сигналов МШ (а), МАШ (б) от напряжений на поверхности при растяжении (1) и изгибе (2)

нием МАШ при контроле на расстоянии труднодоступных зон металлоизделий.

Результаты исследований МШ и МАШ показывают возможность их совместного использования для контроля макронапряжений параметров $P = E_M H_M$ и $R = E_M E_M H_M / H_M$. На рис. 17.44 приведены огибающие распределений энергетических характеристик сигналов МШ – $E_{MШ}$ и МАШ – $E_{МАШ}$ на полупериоде перемагничивания T_n для двух значений приложенных растягивающих напряжений $\sigma_0 = 0$ (сплошные линии) и $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$ (штриховые линии) для образцов из высоколегированной стали. Типичные огибающие МШ имеют один максимум E_m , расположенный вблизи области полей перемагничивания $H_m = H_c$. Типичные огибающие МАШ имеют два максимума – E_{a1} и E_{a2} , расположенных в областях полей перемагничивания, близких к насыщению ферромагнетиков.

С увеличением σ параметры огибающих МШ и МАШ E_m , E_{a1} и E_{a2} также меняются взаимно противоположным образом (см. рис. 17.44), причем значение первого максимума E_{a1} изменяется в 2-3 раза быстрее, чем значение E_{a2} .

Результаты исследований положены в основу построения алгоритмов обработки параметров огибающей МШ:

- для повышения чувствительности и разрешающей способности контроля приложенных напряжений – параметр $R = E_m / H_m$ и параметр $B = E_m / E_{a1}$;

- для повышения достоверности оценки макронапряжений с отстройкой от влияния микронапряжений – параметр $P = E_m H_m$.

На рис. 17.45 приведены результаты исследования изменения огибающих параметров МШ и МАШ в зависимости от приложенных напряжений σ_0 для высоколегированной стали. Видно, что увеличение σ_0 приводит к взаимно противоположным изменениям величин E_m и H_m , а параметры R , B , P растут с разной крутизной.

Результаты сравнительных исследований чувствительности при контроле макронапряжений с использованием параметров E_m , R и B , проведенных на образцах из сталей 35ХЗНМ, 30НГСН2А и 45Х1, показывают, что чувствительность параметров R и B в среднем в 1,8 раза выше чувствительности параметра E_m . Однако в этом случае примерно в 1,3 раза возрастает погрешность, обусловленная квазистационарным характером регистрируемых сигналов МШ. Таким образом, ис-

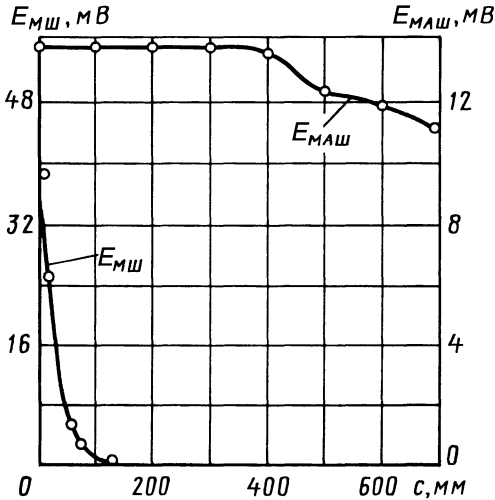


Рис. 17.43. Затухание сигналов МШ и МАШ при удалении преобразователей от зоны перемагничивания

пользование информативного параметра R в среднем в 1,4 раза увеличивает разре-

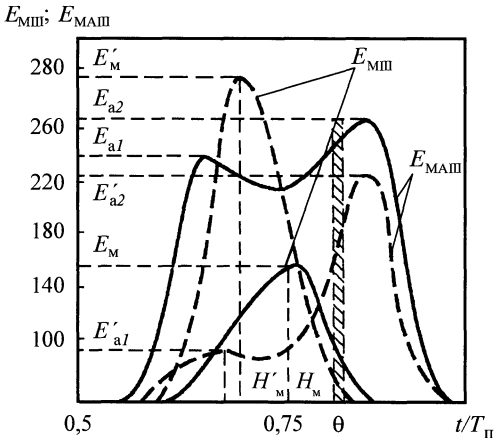


Рис. 17.44. Огибающие распределений энергетических характеристик $E_{MШ}$ и $E_{МАШ}$ при разных значениях растягивающих напряжений σ_0

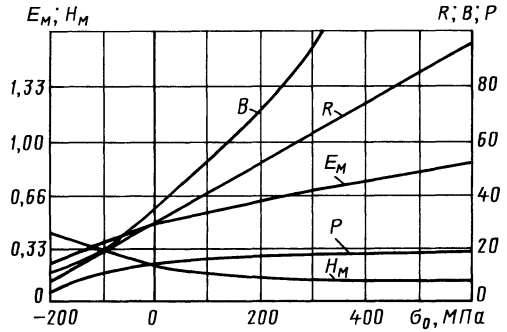


Рис. 17.45. Зависимости параметров огибающих МШ и МАШ от приложенных напряжений

шающую способность при тензометрировании изделий из высокопрочных конструкционных сталей.

Однако их использование при контроле ограничено вследствие влияния мешающих факторов, например флуктуации структурно-фазового состояния контролируемого материала, решением следующих задач:

1) контроль с использованием относительных методов измерений, когда необходимо зарегистрировать изменение состояния материала на одном и том же участке объекта контроля, например, в целях МШ-тензометрии;

2) контроль макронапряжений при обеспечении стабильности структуры материала контролируемого объекта с применением других методов НК, чувствительных к изменению структурно-фазового состояния, например, с использованием намагниченности насыщения.

Параметр P (см. рис. 17.45) обладает наименьшей чувствительностью к макронапряжениям. Однако его нечувствительность к изменениям микронапряжений компенсирует этот недостаток и обеспечивает надежность контроля.

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ

18.1. КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕКСТУРА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Элементарная ячейка (элемент пространственной кристаллической решетки) большинства ферромагнитных материалов представляет собой объемно-центрированный куб. Для обозначения различных кристаллографических плоскостей этого куба и направления его осей используют систему индексов, представляющих собой обратные значения отрезков, отсекаемых данной плоскостью на осях координат. Например, если плоскость параллельна осям x и y , то два первых отрезка равны бесконечности, а обратные их значения – нулю; отрезок на оси Z равен ребру куба, следовательно, третий индекс равен единице. Такая плоскость (грань куба) обозначается символом (001) (рис. 18.1). При обозначении типа плоскости индексы заключаются в фигурные скобки. Грани куба можно обозначить символом (100). Диагональные плоскости обозначаются знаком (110), плоскости октаэдра – (111).

При определении индексов направления осей, их параллельно самим себе переносят в начало координат и координаты любой точки данного направления, отнесенные к единичным отрезкам, заключают в квадратные скобки. Символы ребер куба – [100], [010], [001]. При обозначении типа ребер принимают скобки $\langle \rangle$. Так, символ ребра куба $\langle 100 \rangle$, диагонали грани $\langle 110 \rangle$ и пространственной диагонали $\langle 111 \rangle$.

Кристаллы, как известно, обладают резко выраженной анизотропией физических свойств, т.е. количественно отличающимися характеристиками в разных кристаллографических направлениях. На-

пример, для железа намагничивание в направлениях ребер куба [100] происходит значительно легче, чем в удаленных от них направлениях типа [111]. Если такой кристалл имеет возможность свободного роста, то он приобретает характерную огранку, симметрия которой совпадает с симметрией кристаллической решетки (монокристалл). При производстве металлов и сплавов одновременно происходят зарождение и рост большого числа кристаллов, которые вследствие их взаимодействия теряют естественную огранку, но сохраняют внутреннюю структуру и связанную с ней анизотропию физических свойств. В отличие от кристаллов такие образования в поликристаллическом веществе называют *зернами*, или кристаллитами.

В техническом материале ориентация бесчисленного множества кристаллитов может быть статистически беспорядочной, т.е. такой, что зерна встречаются во всевозможных ориентировках в приблизительно равных количествах. При этом анизотропия свойств отдельных кристаллитов в результате усреднения в целом материале не проявляется. Материал становится изотропным, т.е. обладающим одинаковыми свойствами в разных направлениях.

В противоположность беспорядочной, хаотичной ориентации в ряде материалов с использованием специальных технологий создают такое расположение зерен, при котором все они или многие из них характеризуются упорядоченной ориентацией (рис. 18.2). Преимущественную пространственную ориентацию зерен в поликристалле принято называть *текстурой*. Чем больше кристаллитов образца имеют одинаковую ориентацию, тем больше степень ее совершенства. В случае

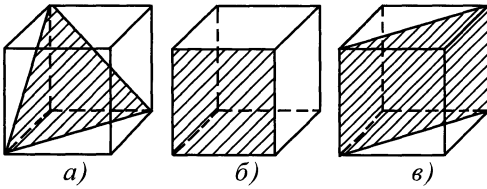


Рис. 18.1. Главные кристаллографические плоскости в кристаллах кубической системы:

a – плоскость октаэдра (111); *б* – грань куба (100); *в* – плоскость ромбического додекаэдра (110)

полного совпадения ориентации всех кристаллитов поликристаллический материал превращается в псевдомонокристалл, проявляя практически такой же характер анизотропии физических свойств, что и монокристалл.

В соответствии с симметрией пространственного распределения кристаллографических осей в текстурованном материале производится классификация текстур. Основные виды текстур следующие (по И.П. Кудрявцеву):

1) *аксиальная текстура*, при которой определенные оси всех зерен параллельны друг другу и некоторому направлению в исследуемом материале, называемому аксиальной осью. Ее индексы определяют тип преимущественной ориентации зерен. Такая текстура встречается в протянутых проволоках, электролитических осадках, слитках и т.д.;

2) *текстура конусного волокна*, при которой некоторые направления зерен образуют вокруг аксиальной оси образца коническую поверхность. Как частный случай, при угле раствора конуса, равном нулю, получают простую аксиальную текстуру;

3) *ограниченная текстура*, встречающаяся в листовых прокатных материалах. Характеризуется тем, что направления $\langle rst \rangle$ и плоскости $\{hkl\}$ зерен соответственно параллельны. Для описания ее типа приводят индексы плоскостей, параллельных поверхности листа, и осей, параллельных направлению прокатки.

Указанные типы текстур могут быть многократными, когда в образце имеется несколько типов преимущественной ориентации зерен.

Описание текстур с помощью индексов преимущественных направлений и плоскостей носит несколько условный, идеализированный характер. Предполагается, что часть объема кристаллитов имеет строго определенную ориентацию, а остальные равномерно рассеяны и не вносят вклада в анизотропию свойств, обусловленную текстурой. Преимуществом такого описания является то, что ориентации можно сравнивать между собой, если они не имеют сложных индексов, и благодаря этому облегчается теоретическое рассмотрение возникновения текстур. В действительности же в поликристаллическом материале почти все кристаллиты участвуют в создании текстуры, имея лишь разную степень рассеивания от идеальной ориентации. Поэтому металловеды часто используют количественное описание текстуры, задавая максимальный интервал углов рассеяния ориентации зерен. Такое представление не обладает большой точностью и может быть применимо, главным образом, в случае однокомпонентной текстуры, и его, как и описание текстуры с помощью идеальной ориентации, трудно ввести в какие-либо расчеты.

Наибольшее распространение получил метод количественного описания текстуры с помощью получаемых при использовании рентгеновских методов исследования полюсных фигур, которые являются графической интерпретацией функций распределения полюсной плотности. Однако в случае многокомпонентных текстур анализ ориентации и их количества по функциям распределения полюсной плотности затруднен.

В последнее время разработан метод выражения текстурованного состояния материала в виде текстурных функций распределения полюсной плотности. Преимуществами такого описания текстуры

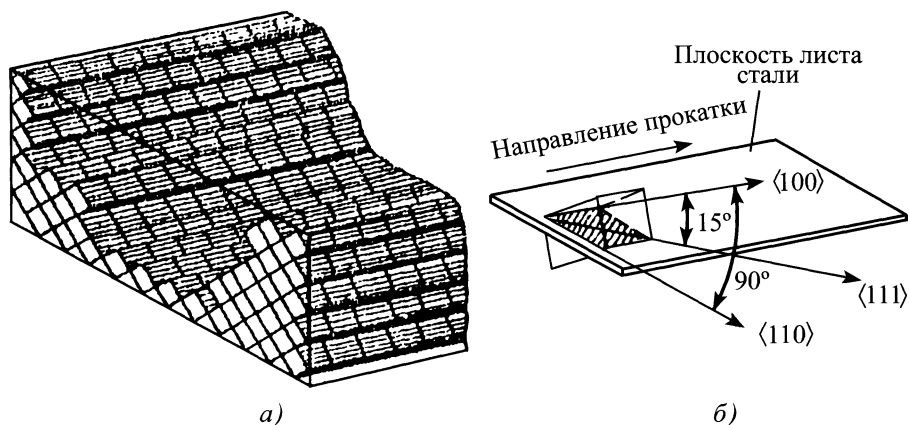


Рис. 18.2. Холоднокатаная электротехническая сталь с ребровой текстурой:

a – схематическое расположение кристаллов; *б* – направление кристаллографических осей

являются, во-первых, возможность однозначной количественной аттестации сложного текстурованного состояния, включая и слабые компоненты; во-вторых, возможность представления в аналитической форме зависимостей между механическими и физическими свойствами материала и его текстурованным состоянием; в-третьих, возможность автоматизации эксперимента при исследовании текстуры материалов.

Более подробно методы количественного описания текстуры описаны в литературе. Отметим лишь, что в настоящее время нет единого подхода к описанию текстуры. В зависимости от типа материала, размера зерна, формы образца, возможностей экспериментального оборудования, практических задач и требований, которые необходимо удовлетворить при постановке исследования, может оказаться более удобным тот или иной метод описания текстуры. В дальнейшем будем использовать главным образом условный и идеализированный метод, который особенно удобен и в большой степени достоверен в случае материала с резко выраженной однокомпонентной текстурой, каким является, например, холоднокатаная анизотропная электротехническая сталь.

18.1.1. Текстура и анизотропия свойств

Поскольку в кристаллах всех металлов физические и механические свойства в большей или меньшей степени зависят от направления, то и в поликристаллическом образце с одинаковой ориентацией кристаллов такая зависимость в монокристалле будет проявляться тем сильнее, чем больше различия свойств в монокристалле и чем совершеннее текстура.

Подробное описание влияния кристаллографической текстуры на анизотропию упругих, прочностных, тепловых, электрических и магнитных свойств различных металлов и сплавов приводится в монографиях. Характер анизотропии механических и магнитных свойств электротехнической стали также достаточно хорошо изучен.

Большое количество работ, посвященных исследованию анизотропии главным образом магнитных свойств, объясняется прежде всего обилием марок электротехнических сталей, весьма различающихся по свойствам, и разнообразием изделий, в которых они используются, при разных режимах перемагничивания (постоянном или переменном токе, в широком диапазоне частот, при различных значениях индукции, форме магнитопровода

18.1. Изменение механических характеристик холоднокатаной стали с ребровой текстурой

Характеристика	Угол с направлением прокатки		
	0°	55°	90°
Предел упругости, МПа	288	380	296
Предел текучести, МПа	373	435	380
Предел прочности, МПа	415	478	450
Относительное удлинение, %	7	2	33
Модуль упругости, ГПа	127	270	210

и т.д.). Не останавливаясь на полном обзоре результатов по этому вопросу, кратко приведем отдельные данные по анизотропии некоторых свойств, наглядно демонстрирующих влияние на них текстуры, учитывая при этом, что магнитные и механические свойства электротехнической стали и ряда других листовых материалов во многом зависят не только от кристаллографической текстуры, но и от таких факторов, как химический состав, условия изготовления, размер зерна, толщина листа, состав и количество вредных примесей, состояние поверхности готовых листов, наличие в них внутренних напряжений и т.д. Поэтому количественные результаты, полученные разными авторами с использованием различных методик, могут несколько отличаться друг от друга.

Современная промышленная холоднокатаная анизотропная электротехническая сталь обладает так называемой *ребровой* текстурой $\{110\} \langle 100 \rangle$, при которой в плоскости листа лежит диагональная плоскость куба (110), а три основных кристаллографических направления $[100]$, $[110]$ и $[111]$ расположены в плоскости листа под углами 0, 90 и 55° соответственно к направлению прокатки. Тип преобладающей текстуры и степень ее выраженности и обуславливает характер ани-

зотропии свойств в стали. Например, модуль упругости может изменяться в зависимости от направления его измерения в стали с ребровой текстурой более чем в 2 раза, а такой параметр, как относительное удлинение, почти в 16 раз (табл. 18.1).

Зависимость механических свойств стали от направления прокатки была использована сотрудниками Всесоюзного института трансформаторостроения. При существовавшей технологии удаления заусенцев с пластин магнитопровода (закатка в валках вдоль направления прокатки) наблюдалось увеличение удельных потерь на 6–7 % и намагничивающего тока при номинальных значениях индукции на 60 %. При изменении угла закатки на 55° магнитные свойства пластин практически оставались на уровне исходных.

На рис. 18.3 показаны кривые анизотропии магнитной индукции, измеренные с помощью аппарата Эпштейна на пробах, вырезанных под углами 0, 15, 30, 45, 75 и 90° к направлению прокатки из отечественной стали марки 3405 и зарубежных сталей М-6Х и Z-12 толщиной 0,35 мм. Также представлена угловая зависимость B_{2500} , измеренная на монокристаллах размером 250 × 30 × 0,5 мм, вырезанных вдоль направления прокатки из очень больших зерен трансформаторной стали и подобранных таким образом, чтобы угол

между направлением [100] в вырезанных полосках и направлением прокатки изменялся от 1 до 74°. В слабых полях ход кривых для сталей разных марок несколько различен. В поле напряженностью 2500 А/м эти кривые практически совпадают. На монокристаллах анизотропия индукции выражена более резко. С увеличением напряженности поля изменяется и характер анизотропии. Зная характер анизотропии магнитных свойств, можно лучше использовать эти свойства на практике. Например, в углах и Т-образных стыках силовых трансформаторов магнитный поток отклоняется от направления прокатки и значительную часть пути проходит в более трудных для намагничивания направлениях. Для обеспечения наиболее благоприятных условий прохождения магнитного потока трансформаторостроители используют так называемые стыки, в которых магнитный поток практически все время идет вдоль направления прокатки, в результате чего значительно улучшаются эксплуатационные характеристики трансформатора.

На рис. 18.4 показан характер анизотропии коэрцитивной силы для сталей разных марок. Данные измерений отражают возможность получения существенно отличающихся друг от друга результатов при использовании разных методик. Если измерить коэрцитивную силу на отдельных полосках, вырезанных из листа в различных направлениях каким-либо "классическим" способом, например путем сдвигания катушки с предварительно намагниченной полоски в соленоиде при постепенном увеличении намагничивающего тока и наблюдения отброса на баллистическом гальванометре, то получим максимальное различие по H_c в 1,5 ... 2 раза. В то же время при измерении значений H_c эрстедометром Ферстера можно видеть, что коэрцитивная сила на анизотропной стали, измеренная вдоль и поперек направления прокатки, может различаться на порядок и более. Подробнее воп-

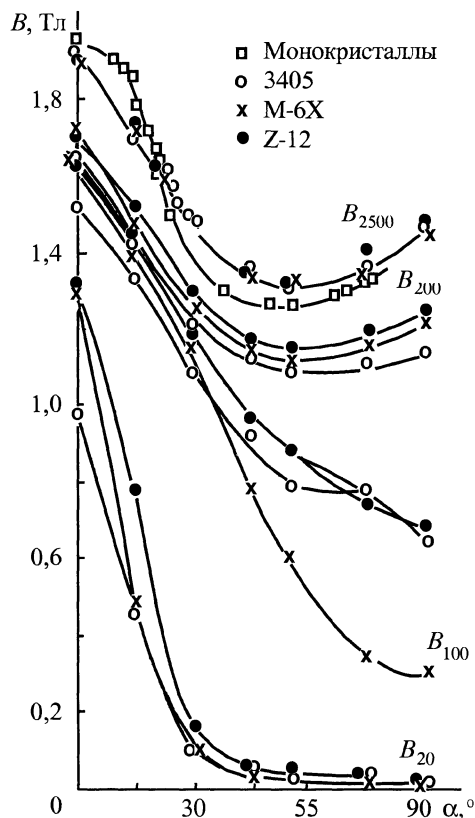


Рис. 18.3. Анизотропия магнитной индукции электротехнической стали разных марок в полях напряженностью 20 ... 2500 А/м

рос о достоверности измерений магнитных характеристик в целом листе и особенностях таких измерений рассмотрен ниже при описании конструкций электромагнитных преобразователей.

Проблема образования фестонов при изготовлении деталей методом глубокой вытяжки из различных листовых материалов (алюминиевых и медных сплавов, малоуглеродистой стали) также связана с вопросами влияния кристаллографической текстуры на свойства этих материалов. При глубокой вытяжке листового материала, обладающего кристаллографической текстурой, удлинении его в различных направлениях по отношению к направлению прокатки происходит поразному. Неравномерность вытяжки дос-

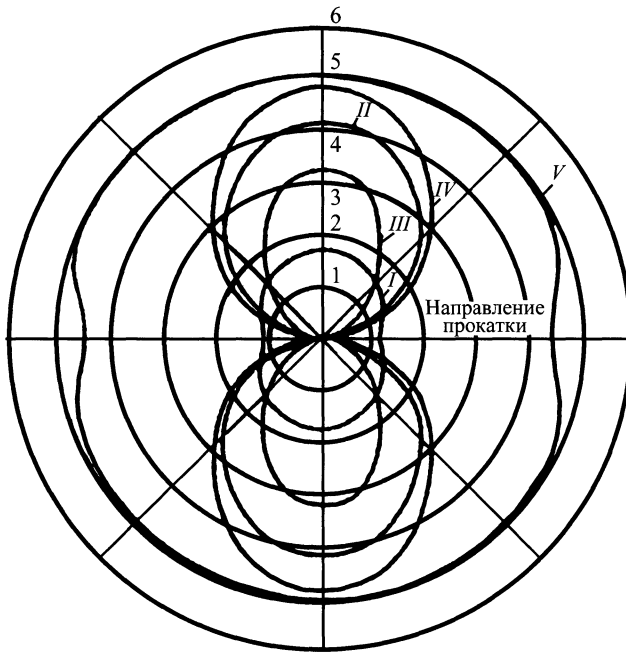


Рис. 18.4. Зависимость коэрцитивной силы (в усл. ед.) от угла с направлением прокатки для листов электротехнической стали разных марок:

I, II – сталь 3405 (разные участки); *III* – сталь Z-12; *IV* – сталь M-6X; *V* – горячекатаная сталь

тигает иногда 5–6 %, что обуславливает лишний расход материала (допуски на излишнюю вытяжку), а во многих случаях (особенно при изготовлении деталей сложной конфигурации) – полный брак изделий. Поэтому желательно иметь идеально изотропный нетекстурованный материал, или стремиться получать такой, при котором влияние текстуры на фесто- ность наименьшее.

Приведенные выше примеры влияния кристаллографической текстуры на анизотропию свойств листовых материалов наглядно показывают необходимость исследования процессов текстурообразования и методов ее определения для более эффективного использования магнитных материалов. Особенно важно располагать оперативными методами определения текстуры при разработке новых технологий получения электротехнических сталей.

Часто на практике степень совершенства кристаллографической текстуры элек-

тротехнической стали оценивают по значению магнитной индукции в ней, которая измеряется в поле напряженностью 2500 А/м, при этом используют достаточно надежную корреляционную связь между B_{2500} и текстурой. Иногда оценивают текстуру по индукции в стали, измеренной в полях меньшей напряженности. Однако такие измерения дают лишь качественное представление о степени совершенства текстуры. Для получения более достоверных сведений о текстуре необходимы специальные измерения.

18.1.2. Методы определения текстуры

Все методы определения текстуры можно разделить на основные (или прямые) и косвенные. *Основные* методы (к которым относятся рентгеновский и оптический) позволяют получить информацию о расположении кристаллитов в металле, т.е. кроме выраженности текстуры позво-

ляют определить ее тип. *Косвенные* методы дают возможность оценить текстуру по изменению характера анизотропии тех или иных свойств металла. Как правило, косвенные методы не позволяют достоверно (без дополнительных данных) судить о типе текстуры. Общей характеристикой основных методов является их трудоемкость при достаточной достоверности, а косвенных – простота и удобство при относительно меньшей информативности.

18.2. МАГНИТНЫЙ ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Магнитный текстурный анализ включает экспериментальные методы определения анизотропии механического момента, действующего на аксиально-симметричный образец, помещенный в однородное магнитное поле, или определения нормальной к направлению внешнего поля составляющей вектора намагниченности, а также теоретические расчеты, позволяющие по этим данным вычислить параметры, характеризующие рассеяние текстуры. Созданию магнитного текстурного анализа непосредственно предшествовала работа О. Даля и Р.И. Пфаффенбергера. Они экспериментально показали, что анизотропия механического момента весьма чувствительна к текстуре, и высказали предположение, что указанная анизотропия может быть использована для определения текстуры. Однако их эксперименты носили качественный характер.

18.2.1. Метод Акулова–Брюхатова

Метод количественного расчета параметров, характеризующих рассеяние текстуры, который и стал исторически первым методом магнитного текстурного анализа, был разработан Н.С. Акуловым и Н.Л. Брюхатовым. В основу их расчетов была положена впервые установленная ими связь между механическим моментом и свободной энергией магнитной анизотропии.

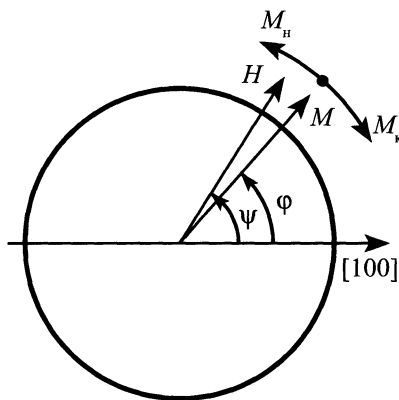


Рис. 18.5. Схема действия моментов M_n и M_k на диск, находящийся во внешнем магнитном поле

Рассмотрим монокристалл (рис. 18.5), который помещен в постоянное внешнее поле напряженностью H , составляющее угол ψ с осью легкого намагничивания. С увеличением поля вектор намагниченности M , который лежит в плоскости векторов H , будет отклоняться от оси легкого намагничивания в сторону вектора поля на некоторый угол φ . Величину отклонения вектора намагниченности M от оси легкого намагничивания (угол φ) можно найти из условия минимума полной энергии исследуемого образца, состоящей из его внутренней энергии и энергии магнитного взаимодействия, приложенной со стороны внешнего поля. Внутренняя энергия $E_{внут}$ представляет собой энергию кристаллографической анизотропии и определяется соотношением

$$E_{внут} = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + K_3(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2)^2, \quad (18.1)$$

где K_1, K_2, K_3 – константы магнитной анизотропии; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – направляющие косинусы вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям.

Энергия внешнего магнитного поля

$$E_{внеш} = -HM_s \cos(\psi - \varphi), \quad (18.2)$$

следовательно, полная энергия

$$E = E_{\text{внут}} + E_{\text{внеш}} = E_{\text{внут}} - HM_s \cos(\psi - \varphi). \quad (18.3)$$

Энергии $E_{\text{внут}}$ и $E_{\text{внеш}}$ обуславливают появление механических моментов M_k и M_n соответственно (крутящий момент, действующий на единицу объема кристалла, равен скорости изменения плотности энергии при изменении угла поворота $M_{kp} = -dE/d\varphi$), действующих на вектор намагниченности и стремящихся повернуть образец. Положение образца в магнитном поле характеризуется минимальным значением полной энергии.

Из условия минимума энергии

$$dE/d\varphi = 0 \quad (18.4)$$

имеем

$$\frac{dE}{d\varphi} = \frac{dH_k}{d\varphi} - HM_s \sin(\psi - \varphi). \quad (18.5)$$

Таким образом, в положении равновесия диска, характеризующегося минимумом полной энергии, механические моменты равны по значению и противоположны по направлению:

$$M_k = -M_n. \quad (18.6)$$

На основании равенства (18.6) можно получить формулы для вычисления механических моментов:

$$M_k = -dE_k/d\varphi; \quad (18.7)$$

$$M_n = HM_s \sin(\psi - \varphi) = HM_n, \quad (18.8)$$

где M_n – нормальная составляющая вектора намагниченности. Выражение (18.8) показывает полную идентичность кривых механического момента и нормальной составляющей вектора намагниченности.

При увеличении напряженности магнитного поля и при больших полях порядка 3000 А/см угол φ практически совпадает с углом ψ . Это позволяет проводить расчет текстуры, пользуясь одним углом φ , при условии получения кривых анизотропии в больших полях.

Если в единице объема поликристаллического образца только часть объема кристаллитов (W) имеет определенную кристаллографическую ориентацию (интенсивность текстуры), то энергия кристаллографической анизотропии (с учетом одной константы анизотропии K_1)

$$E_k = K_1 W (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2). \quad (18.9)$$

Косинусы углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ для диска можно выразить через угол φ , и вид кривых момента вращения M_k , вычисленных по формуле (18.9), будет зависеть от типа кристаллографической текстуры.

Для образцов с ребровой текстурой [100]

$$M_k = -\frac{K_1 W}{4} \sin(2\varphi) - \frac{3K_1 W}{8} \sin(4\varphi). \quad (18.10)$$

Экспериментальная кривая механического момента достаточно точно определяется выражением (рядом Фурье)

$$M_n = \sum A_{2n} \sin(2n\varphi);$$

$$M_n = A_2 \sin(2\varphi) + A_4 \sin(4\varphi). \quad (18.11)$$

Сравнив коэффициенты при одинаковых гармониках в выражениях (18.10) и (18.11), можно получить формулы для определения степени совершенства кристаллографической текстуры по амплитудам A_2 и A_4 :

$$W = -4A_2/K_1; \quad W = -8A_4/(3K_1). \quad (18.12)$$

Если расчет кристаллографической текстуры выполнять с учетом не одного, а трех членов уравнения энергии магнитной анизотропии, то формулы для количественного определения ребровой текстуры будут иметь вид

$$W = \frac{A_2}{K_1/4 + K_2/64 + 11K_3/128}; \quad (18.13)$$

$$W = \frac{A_4}{3K_1/8 + K_2/16 + 17K_3/128}.$$

Количественное определение текстуры по приведенным выше формулам возможно при условии, если W – часть объема кристаллитов – имеет строго определенную ориентацию, а остальная часть кристаллитов равномерно рассеяна и имеет беспорядочную ориентацию. В действительности же почти все кристаллиты участвуют в создании текстуры, имея лишь разную степень рассеивания относительно идеальной ориентации, поэтому количественное определение текстуры по формулам (18.12) и (18.13) является несколько условным. А.С. Виглиным и И.П. Кудрявцевым предложено проводить количественную оценку текстуры по степени ее рассеивания. Для ребровой текстуры характерна прямая связь между амплитудами гармоник момента вращения A_n и дисперсией углов α_3 :

$$A_n = nb_n \cos(n\sigma_{\alpha_3}), \quad (18.14)$$

где b_n – экспериментальный коэффициент; A_n – амплитуда n -й гармоники; σ_{α_3} – дисперсия угла поворота оси [001] вокруг нормали к листу.

18.2.2. Определение текстуры по кривым крутящего момента

Для определения текстуры магнитным методом необходимо получить экспериментальные зависимости механического момента $M_{кр}(\varphi)$ или нормальной составляющей вектора намагниченности $M_n(\varphi)$ от угла поворота образца в постоянном магнитном поле достаточно большой напряженности, а затем путем гармонического анализа выделить среди этих кривых амплитуды четных гармоник, т.е. определить коэффициенты ряда Фурье; при этом необходимо знать значения констант анизотропии исследуемого материала.

Для разложения кривых $M_{кр}(\varphi)$ или $M_n(\varphi)$ в ряд Фурье до появления магнитных текстурометров использовали метод практического гармонического анализа. Этот метод очень трудоемкий и дает относительно точные результаты при вычислении лишь первых двух гармоник – A_2 и A_4 . Точность определения амплитуды A_6 при этом может составлять $\pm 50\%$. При определении текстуры крупнозернистых материалов, например электротехнической стали, для повышения достоверности результатов приходится применять большое количество образцов.

Существует метод математического расчета амплитуд гармоник A_2, A_4, A_6, A_8 непосредственно по кривой крутящего момента без применения разложения. Поскольку кривая $M(\varphi)$ описывается уравнением

$$M_{кр} = A_2 \sin(2\varphi) + A_4 \sin(4\varphi) + A_6 \sin(6\varphi) + A_8 \sin(8\varphi), \quad (18.15)$$

то, взяв на экспериментально полученной кривой $M_{кр}(\varphi)$ значения $M_{кр}$ для четырех разных углов φ , можно получить систему уравнений

$$M_{кр}(15^\circ) = A_2 \frac{1}{2} + A_4 \frac{\sqrt{3}}{2} + A_6 + A_8 \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$M_{кр}(30^\circ) = A_2 \frac{\sqrt{3}}{2} + A_4 \frac{\sqrt{3}}{2} - A_8 \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$M_{кр}(60^\circ) = A_2 \frac{\sqrt{3}}{2} - A_4 \frac{\sqrt{3}}{2} + A_8 \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$M_{кр}(75^\circ) = A_2 \frac{1}{2} - A_4 \frac{\sqrt{3}}{2} + A_6 \frac{\sqrt{3}}{2},$$

из которой можно достаточно просто найти значения четырех гармоник. Метод упрощает вычисление амплитуд гармоник, однако его точность может оказаться низкой, поскольку для расчета используются всего четыре точки на исследуемой кривой.

18.3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МАГНИТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКСТУРЫ

18.3.1. Анизометры для измерения механического момента

Впервые указанные анизометры были сконструированы Вейсом еще в 1905 году. В дальнейшем их конструкция совершенствовалась, однако принципиальная схема прибора оставалась без изменений: образец в форме диска закрепляется в держателе, подвешенном на упругой нити между полюсами электромагнита.

Механический момент, действующий на образец при наличии внешнего поля, можно вычислить по углу закручивания упругой нити:

$$M_{кр} = k\alpha, \quad (18.16)$$

где k – коэффициент упругости нити; α – угол закручивания нити, выраженный в радианах.

Обычно коэффициент упругости нити определяют через момент инерции J , равный для диска

$$J = (mr^2)/2 \quad (18.17)$$

(m – масса диска; r – его радиус), и частоту колебаний (если не учитывать затухание крутильных колебаний)

$$\omega = 2\pi/T = \sqrt{k/J}, \quad (18.18)$$

где T – период колебаний системы.

Из выражения (18.18) получаем

$$k = (4\pi^2 J)/T^2.$$

Помещая в подвижную систему диски с различным моментом инерции и измеряя период колебаний, можно исключить неизвестный момент инерции всей подвижной конструкции, используемой для закрепления образца.

Угол закручивания в этих приборах определялся по показаниям стрелочных угломеров, один из которых соединен с

неподвижной, а другой – с подвижной системой анизометра. В большинстве конструкций регистрация угла поворота осуществлялась с помощью светового луча, отраженного зеркалом на шкалу с делениями, которое закреплено на подвижной системе анизометра. В некоторых анизометрах определение угла закручивания нити производилось специальным микроскопом или гониометром.

Направление магнитного поля изменялось поворотом или электромагнитов, или всего анизометра относительно магнитов. Для уменьшения свободных колебаний подвижной системы в ряде анизометров подвижная часть связана с демпфирующим поплавком, погруженным в жидкость. В некоторых конструкциях предусмотрено помещение анизометра в изолированный сосуд, в котором можно создать вакуум. Это предохраняет образец от образования окалины при нагреве до температуры 700 °С и от конденсации на нем паров воды при охлаждении до температуры жидкого азота.

В некоторых анизометрах применен метод баланса, или, как его называют, нулевой метод. Такой анизометр описан Р. Бозортом. Образец в зеркалом подвешен между двумя нитями: верхней, соединяющей неподвижную систему прибора с подвижной, и нижней, на конце которой закреплен диск с нанесенной шкалой. При действии магнитного поля возникает механический момент, закручивающий верхнюю нить. Вращением диска со шкалой закручивают нижнюю нить до тех пор, пока образец не возвратится в первоначальное положение. Это можно определить по положению светового луча, отраженного от зеркала. Разность отсчета по шкале при наличии поля и при его отсутствии является мерой механического момента.

Большое разнообразие конструкций анизометров, разработанных в последнее время, обусловлено множеством типов преобразователей, используемых для ре-

гистрации угла поворота образца, а также различными сочетаниями сред и условий, в которых находится образец (давление, температура и др.). Известны анизометры, в которых использована фактически все известные методы преобразования механических перемещений в электрический сигнал (индукционный, фотокомпенсационный, тензометрический и т.д.).

18.3.2. Анизометры для измерения нормальной составляющей вектора намагниченности

Анизометр для измерения нормальной составляющей вектора намагниченности в переменном магнитном поле работает следующим образом. Исследуемый образец помещают в переменное поле. В образце возникает переменная по значению и направлению нормальная составляющая, которая индуцирует в измерительной катушке переменную ЭДС. Сигнал усиливается электронным усилителем, выпрямляется и регистрируется стрелочным гальванометром.

Другой тип анизометра предназначен для работы на тонких пленках. Чтобы избежать наведения в измерительной катушке паразитных сигналов, образец вращается не электромотором, а турбинкой с частотой до $12\ 000\ \text{мин}^{-1}$. На валу турбинки укреплено зеркало, отбрасывающее луч света на фотоэлемент для градуирования изображения на осциллографе по углу поворота образца.

Рассмотренные приборы для магнитного текстурного анализа представляют собой уникальные лабораторные устройства, изготовленные в единичных экземплярах различными исследователями. В преобладающем большинстве эти приборы очень сложны в изготовлении, при подготовке их к работе необходима практически ювелирная настройка, процесс измерения на них трудоемок и требует высокой квалификации экспериментатора. Сравнить разные типы анизометров по их чувствительности и точности измерений практически не представляется возмож-

ным, поскольку они, кроме способа регистрации сигнала, различаются по качеству выполнения ответственных узлов, по напряженности и характеру используемых магнитных полей (постоянные, переменные разной частоты и т.д.), по размеру и форме исследуемых образцов, по условиям испытаний и другим параметрам. Они позволяют получить только кривые $M_{кр}(\varphi)$ и $M_n(\varphi)$, тогда как для количественного определения степени текстурованности, как уже указывалось, необходим дополнительный гармонический анализ этих кривых, который очень трудоемок и вносит дополнительные погрешности в результаты исследования текстуры.

18.3.3. Магнитные текстурометры

Принцип действия этих приборов заключается в получении непрерывной во времени графической зависимости нормальной составляющей вектора намагниченности M_n от угла поворота φ образца в постоянном магнитном поле, наблюдении формы этой кривой на экране осциллографа и выделении из нее амплитуд четных гармоник современными электронными средствами. По форме кривой $M_n(\varphi)$ можно судить о типе текстуры (рис. 18.6), по амплитудам гармоник – о степени ее выраженности.

Текстурометр состоит из синхронного электромотора 1 (рис. 18.7), вращающего круглую оправку 2, которая расположена между полюсами электромагнита постоянного тока 3. В оправку помещается образец в форме диска диаметром 30 мм (выбор такого диаметра диска обусловлен тем, что прибор предназначен в основном для определения степени совершенства кристаллографической текстуры анизотропной электротехнической стали. При этом, как правило, диски приходилось выштамповывать из полосок стали, предназначенных для эпштейновской пробы и имеющих ширину 30 мм. В дальнейшем для удобства штамповки дисков диаметр образцов был уменьшен до 28 мм).

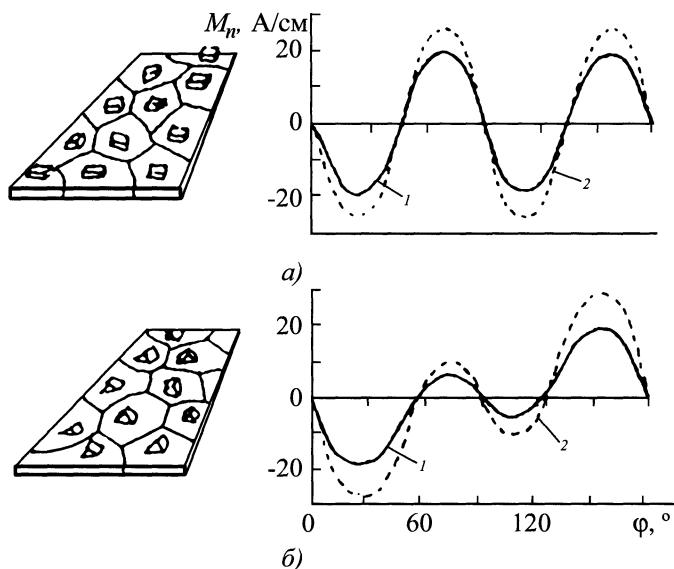


Рис. 18.6. Расположение кристаллов и кривые нормальной намагниченности для поликристаллических образцов (1) и монокристаллов (2)

Образец охватывает измерительная обмотка 4, витки которой строго параллельны силовым линиям поля. ЭДС, возникающая в измерительной обмотке при вращении образца, пропорциональна производной нормальной составляющей вектора намагниченности по углу поворота $dM_n / d\phi$. Сигнал с измерительной обмотки поступает на интегрирующий усилитель 5, представляющий собой усилитель постоянного тока, собранный по каскадной схеме с глубокой отрицательной обратной связью. С выхода интегрирующего усилителя сигнал, пропорциональный изменению нормальной составляющей с углом поворота образца (M_n / ϕ), подается на вход резонансного измерительного усилителя 6, настроенного на частоты второй, четвертой, шестой и восьмой гармоник кривой. Настройка на резонансные частоты осуществляется при помощи четырех двойных Т-образных мостов, включенных в цепь обратной связи каскадной части усилителя. Полоса пропускания каждого моста не превышает 3 Гц. Для измерения нужной гармоники к усилителю

подключается мост, настроенный на соответствующую частоту. Отсчет амплитуд гармоник осуществляется по шкале стрелочного прибора 7, подключенного к выходу усилителя. Параллельно интегрирующему и резонансному усилителю включен электронный осциллограф 8, с помощью которого можно наблюдать и фотографировать вид кривой нормальной составляющей вектора намагниченности и ее производную (рис. 18.8).

Процесс определения интенсивности текстуры опытного образца сводится к помещению его в оправку, включению электромагнита и мотора и измерению амплитуд гармоник по показаниям прибора.

Для определения амплитуд четных гармоник и степени совершенства текстуры при использовании описанного текстурометра необходимо времени приблизительно в 60 раз меньше, чем на получение тех же данных на анизометрах других типов. Важнейшим преимуществом рассмотренного прибора является то, что он дает возможность не только получить вид кривой анизотропии, но и быстро изме-

речь амплитуды гармоник этих кривых, т.е. позволяет очень быстро получить значения параметров, непосредственно входящих в формулы для расчета степени текстурованности. Это исключает операцию практического гармонического анализа кривых анизотропии. Опыт эксплуатации магнитного текстурометра свидетельствует о высокой надежности получаемых результатов. Использование его при массовом контроле текстуры образцов магнитомягких материалов дает большую экономию времени.

Магнитный текстурометр МТ-1. На практике часто определяют текстуру путем сравнения исследуемого образца со стандартным образцом, в качестве которого используют монокристалл с известным типом текстуры. Сравнение обычно проводят по амплитуде четвертой гармоники кривых анизотропии, поскольку именно на нее меньше, чем на амплитуду, например, второй гармоники, влияют такие факторы, как наличие внутренних напряжений в образце, отклонение формы диска и др. Исходя из такого подхода к анализу текстуры разработан магнитный текстурометр МТ-1.

Этот прибор позволяет на экране электронно-лучевой трубки наблюдать зависимость нормальной составляющей вектора намагниченности от угла поворота образцов в магнитном поле, характеризующую тип кристаллографической текстуры, а также путем выделения на кривой четвертой

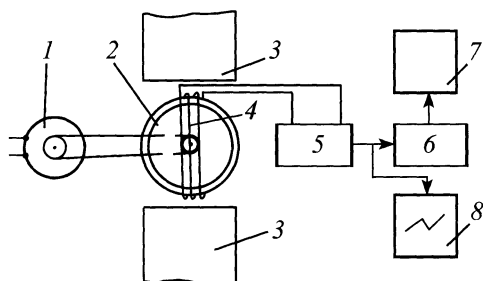


Рис. 18.7. Схема магнитного текстурометра

гармоники осуществлять по шкале прибора непосредственный отсчет степени совершенства текстуры.

Текстурометр рассчитан на определение степени совершенства ребровой (110) [001] и кубической (100) [001] текстур и проградуирован для четырех фиксированных значений толщины образца (0,10; 0,20; 0,35; 0,50 мм), наиболее характерных для листовой электротехнической стали.

Прибор состоит из двух блоков – намагничивающего и измерительного (рис. 18.9). Намагничивающий блок представляет собой постоянный магнит 1, выполненный из двух полюсных наконечников из магнитомягкого материала, замкнутых снизу плитой из армо-железа. Воздушный зазор между полюсами – 50 мм, напряженность магнитного поля в центре зазора – 278 000 А/м. На плите между полюсными наконечниками укреплен синхронный электромотор (СД-09Л) 2, кото-

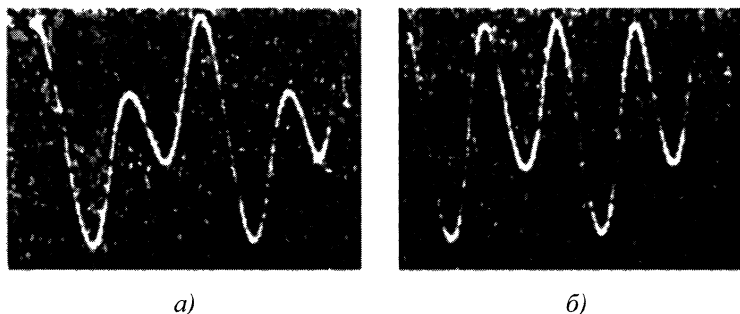


Рис. 18.8. Кривые нормальной составляющей вектора намагниченности (а) и ее производной по углу поворота (б) для образцов с текстурой (110) [001]

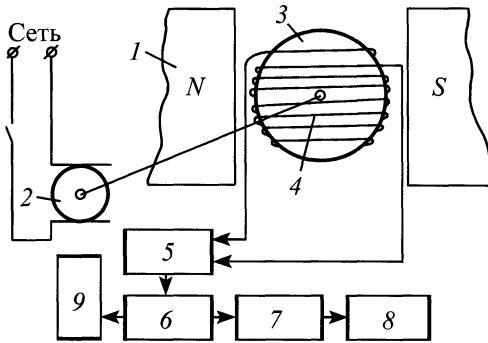


Рис. 18.9. Схема текстурометра МТ-1

рый вращает расположенную строго в центре воздушного зазора магнита оправку из оргстекла 3, представляющую собой плоский диск с симметрично обрезанными сегментами. Внутренняя часть оправки проточена на глубину 1 мм по диаметру образца, равному 30 мм. В это углубление вставляется образец в форме диска, который фиксируется сверху приклепанной к буртику оправки плоской пружиной из фосфористой бронзы.

Симметрично относительно оправки расположены две включенные последовательно измерительные катушки 4. Оси катушек перпендикулярны к силовым линиям поля. Оправка с образцом вращается с постоянной скоростью внутри катушек. Возникающая при этом в измерительной обмотке ЭДС пропорциональна производной нормальной составляющей вектора намагниченности по углу поворота $dM_n / d\varphi$. Сигнал с измерительной обмотки подается в измерительный блок, который смонтирован в отдельном корпусе, соединен с электродвигателем и катушками кабелем и состоит из интегрирующего усилителя 5, усилителя напряжения 6, избирательного усилителя 7, вольтметра 8 и осциллографа 9. Исследуемый образец вставляется в оправку, включается электродвигатель. По виду кривой на экране осциллографа определяется тип текстуры. По шкале прибора отсчитывается интенсивность текстуры в процентах. Время,

требуемое для измерения одного образца, не превышает 20 ... 30 с.

Магнитные текстурометры МТ-2–МТ-4. Приборы МТ-2, МТ-3, МТ-4 отличаются упрощенными конструктивным и схемными решениями, а также добавлением к ним устройства для отметки на экране осциллографа момента начала поворота диска и моста для выделения сигнала, пропорционального амплитуде второй гармоники A_2 – для текстурометра МТ-2, а также использованием гетеродинного метода выделения гармоник A_2 , A_4 , A_6 и A_8 – для текстурометра МТ-3.

Текстурометры состоят из двух блоков – намагничивающего и измерительного. Для наблюдения за формой кривой нормальной составляющей дополнительно подключается осциллограф любого типа.

Основным отличием намагничивающего блока является усовершенствованная конструкция преобразователя (рис. 18.10). В нем предусмотрено удобное и надежное крепление образца в оправке, а также механическое устройство, обеспечивающее четкую отметку начала отсчета на кривой нормальной составляющей. Отметка начала отсчета служит для привязки мгновенных значений сигнала к положению оси легкого намагничивания образца относительно направления силовых линий магнитного поля. Если при установке образца в оправку расположить его таким образом, чтобы направление прокатки совпадало с направлением внешнего поля в момент попадания импульса света на фототриод, то метка на кривой, наблюдаемая в виде острого тонкого пика, будет указывать начало поворота образца, т.е. будет отмечать на осциллограмме полный его оборот от 0 до 360 °С. Форма кривой в пределах выделенного периода позволяет в случае однокомпонентных текстур определить знаки гармоник, а также более четко различить тип наблюдаемой текстуры.

При каждом обороте диска на фототриод попадает импульс света. Возникающие при этом импульсы напряжения с эмиттера фототриода подаются через кон-

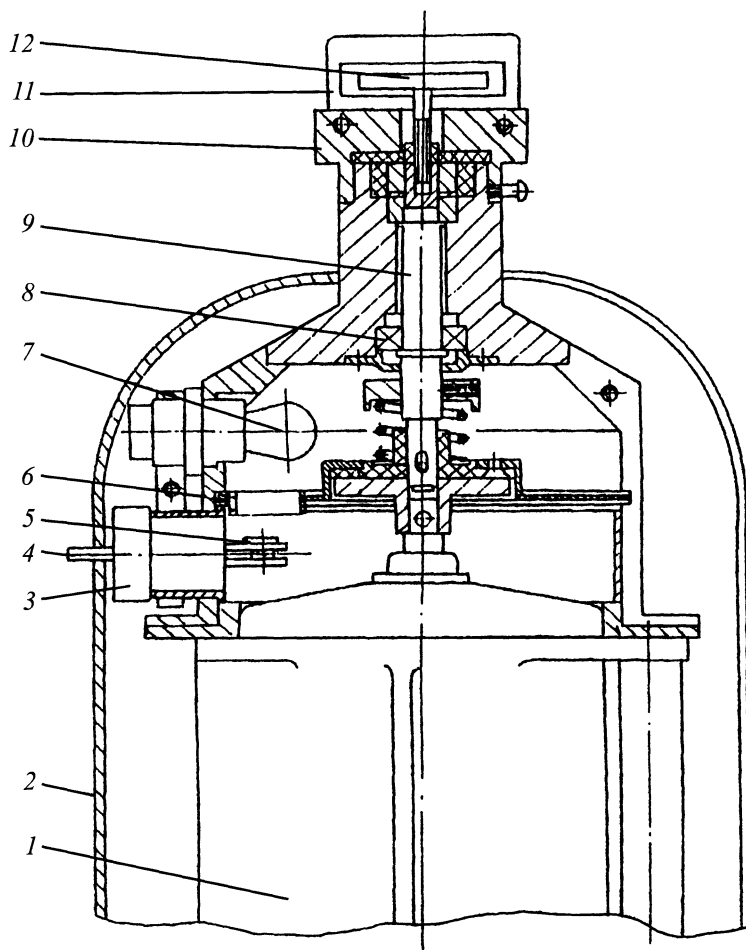


Рис. 18.10. Преобразователь текстурометра:

1 – электродвигатель; 2 – кожух; 3 – подвижный кронштейн; 4 – рычаг кронштейна;

5 – фототриод; 6 – диск с прорезью; 7 – осветительная лампочка; 8 – подшипник;

9 – упругий валик; 10 – платформа; 11 – измерительные катушки; 12 – столик с фиксирующей пружиной для образца

денсатор на вход усилителя напряжения и видны на экране осциллографа в виде всплесков.

Расчет степени совершенства кристаллографической текстуры с помощью рассматриваемых текстурометров может осуществляться либо путем сравнения с монокристаллом, либо абсолютным способом.

Магнитный текстурометр МТ-4 принципиально отличается от приборов

МТ-2 и МТ-3 измерительным блоком, который можно использовать в сочетании с любыми намагничивающими системами при условии, что частота вращения образца в преобразователе равна 3000 мин^{-1} . Текстурометр МТ-4 позволяет измерять гармоники A_2, A_4, A_6, A_8 производной нормальной составляющей вектора намагниченности $dM_n / d\varphi$ в пределах $0,5 \dots 1000 \text{ мВ}$ ($0 \dots 3; 0 \dots 10; 0 \dots 30; 0 \dots 100; 0 \dots 300; 0 \dots 1000$). При подключении осциллографа

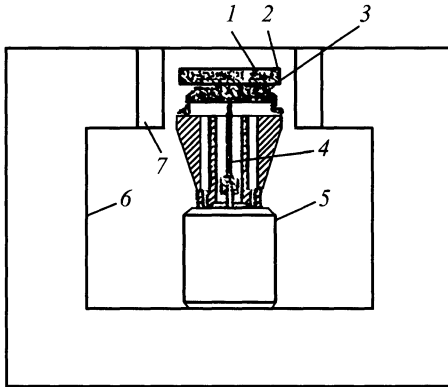


Рис. 18.11. Намагничивающий блок магнитного текстурометра МТ-5:

1 – образец; 2 – оправка для размещения образца; 3 – измерительные катушки; 4 – ось вращения оправки; 5 – микроэлектродвигатель; 6 – магнитопровод; 7 – постоянные магниты

можно наблюдать вид функции $M_{кр}(\varphi)$, эквивалентной функции $M_n(\varphi)$.

Магнитные текстурометры МТ-5 – МТ-7. Главное отличие магнитных текстурометров МТ-5, МТ-6, МТ-7 состоит в том, что благодаря использованию для

намагничивания образцов новых постоянных самариекобальтовых магнитов с высокой энергией масса намагничивающего блока уменьшена приблизительно в 50 раз. Для вращения образца применен микроэлектродвигатель постоянного тока со схемой стабилизации скорости вращения. Эти изменения позволили выполнить намагничивающий блок и преобразователь миниатюрными и разместить их конструктивно в одном блоке с измерительным (рис. 18.11).

Текстурометры включают магнитную систему из двух плоских магнитов размером $40 \times 40 \times 16$ мм и соединяющего их магнитопровода, электродвигатель постоянного тока с регулятором частоты вращения, две измерительные катушки, избирательный усилитель четвертой гармоники с выходом на стрелочный прибор, интегрирующий усилитель, калибратор, работающий синхронно с вращением образца за счет синхроконтakta.

Используя условие непрерывности тангенциальной составляющей поля на

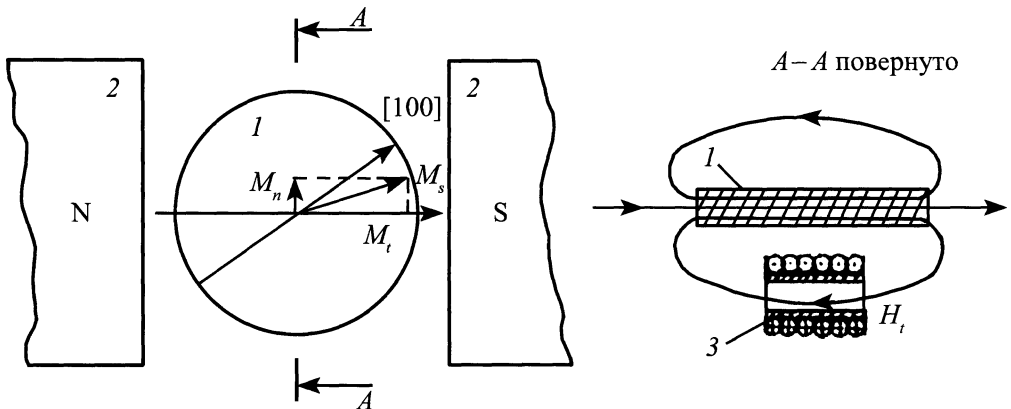


Рис. 18.12. Схема расположения измерительных катушек в преобразователях текстурометров МТ-5 и МТ-7:

1 – образец; 2 – полюсы намагничивающей системы; 3 – измерительная катушка; [100] – одна из осей легкого намагничивания образца; M_s , M_t , M_n – намагниченность насыщения и ее продольная и нормальная составляющие; H_t – тангенциальная составляющая поля рассеяния

границе двух сред, можно измерить катушкой, которая расположена вблизи одной из поверхностей образца таким образом, что ее витки параллельны силовым линиям намагничивающего поля (ось катушки перпендикулярна к направлению внешнего поля), тангенциальную компоненту поля рассеяния H_t , обусловленного нормальной составляющей вектора намагниченности M_n (рис. 18.12). Величина H_t пропорциональна M_n и несет такую же информацию о текстуре образца.

18.4. ПЕРВИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕКСТУРЫ И АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

18.4.1. Преобразователи с П-образным магнитопроводом

Преобразователи данного типа получили наибольшее распространение. Рассмотрим схему магнитного текстурометра К.В. Григорова (рис. 18.13). Прибор состоит из электромагнита 2, полюса которого прижаты к листу 1. Намагничивающие катушки 3 электромагнита питаются постоянным током от батареи аккумуляторов 5. Ток регулируется реостатом 4 и регистрируется амперметром 6. Сначала лист намагничивается поперек направления прокатки. Во время измерения магнит поворачивается на 90° , оставаясь прижатым к листу, при этом изменяется поток в электромагните. В индикаторных катушках 7, надетых на полюсы электромагнита, индуцируется ЭДС, которая при постоянной скорости поворота электромагнита пропорциональна изменению магнитного потока; ЭДС измеряется стрелочным гальванометром 8. Поворот магнита на 90° осуществляется за 5 с. Полное время на проверку одного листа составляет 20 ... 30 с.

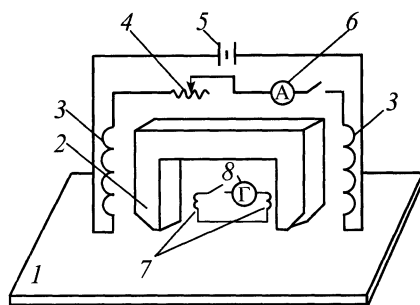


Рис. 18.13. Магнитный текстурометр Григорова

Для обеспечения постоянства магнитного сопротивления в месте соприкосновения полюсов электромагнита с поверхностью изделия электромагнит выполнен из ряда не связанных друг с другом пластин, упруго прижимаемых (каждая в отдельности) к исследуемой поверхности. Таким образом К.В. Григоров решил проблему уменьшения влияния зазора на результаты измерений, являющуюся основной помехой при использовании всех без исключения приставных магнитоконтактных преобразователей. Известно, что изменение магнитного сопротивления зазора во столько раз повышает погрешность измерений, во сколько раз магнитная проницаемость исследуемого металла больше магнитной проницаемости среды зазора. Для конструкционных сталей это отношение достигает 2000 ... 3000, поэтому изменение зазора на несколько микрометров может повлечь ошибки, близкие к измеряемым значениям. Еще существеннее это влияние для магнитомягких материалов.

Множеству методов и средств устранения влияния зазора посвящено гораздо больше работ, чем непосредственно средствам измерений, т.е. эта проблема представляет отдельное важное направление, и здесь ее касаться не будем.

На рис. 18.14 приведена схема пространственного преобразователя для измерения анизотропии магнитных свойств, разработанного Ю.Я. Мехонцевым. Преоб-

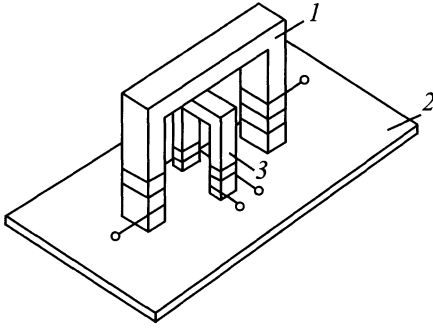


Рис. 18.14. Первичный преобразователь Мехонцева

разователь состоит из двух П-образных сердечников – намагничивающего 1 и индикаторного 3 с нанесенными на них обмотками (возбуждения и индикаторной) и расположенными один над другим так, что следы полюсов на испытуемом листе 2 образуют квадрат. В случае измерения магнитоизотропного ненапряженного материала полюсы сердечника с индикаторной обмоткой находятся в эквипотенциальных точках и напряжение на измерительной обмотке равно нулю. При наличии механических напряжений в металле изменяются условия прохождения магнитного потока между полюсами и в измерительной обмотке возникает ЭДС, по которой можно судить о значениях механических напряжений.

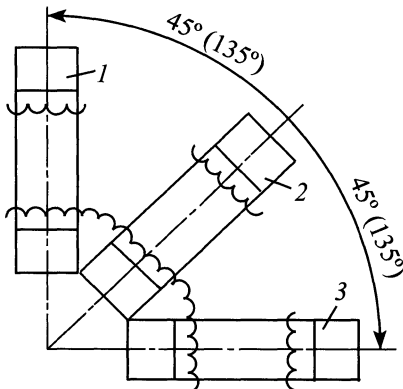


Рис. 18.15. Первичный преобразователь Анфилофьева

Новые преобразователи могут быть дополнены электронным коммутатором, вход которого подключен к источнику переменного тока, а выход соединен с возбуждающими обмотками. Устройство снабжено сложной системой, обеспечивающей поступление под полюсы П-образных магнитопроводов вязкой магнитопроводящей суспензии, а индикатор магнитной анизотропии изготовлен в виде постоянного магнита, полюсы которого в процессе контроля размещаются на поверхности изделия. Измерительная система выполнена в виде установленного с возможностью поворота относительно магнита коромысла и двух стержневых магнитов на его концах, которые своими полюсами ориентированны, как и одноименные полюсы магнита. С коромыслом связан стрелочный указатель с двусторонней шкалой.

Основная цель применения подобных устройств – измерение относительного значения магнитных характеристик поверхности металла для двух заранее выбранных направлений, которые определяются при повороте вокруг вертикальной оси установленных на металл преобразователей. При плоском напряженном состоянии главные напряжения расположены под углом 90° друг к другу, и преобразователь магнитной анизотропии должен сравнивать магнитные свойства также в этих координатных направлениях.

Напряжения на поверхности под углом α к направлению главных напряжений σ_1 и σ_2 можно представить в виде

$$\sigma_\alpha = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2) + 0,5(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\alpha);$$

$$\sigma_{\alpha+90^\circ} = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2) - 0,5(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\alpha).$$

Вычтя второе равенство из первого, получим

$$\sigma_\alpha - \sigma_{\alpha+90^\circ} = (\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\alpha).$$

Касательные напряжения на той же площадке

$$\tau_\alpha = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2)\sin(2\alpha).$$

Преобразователями магнитной анизотропии можно измерять разность нормальных напряжений по двум взаимно перпендикулярным направлениям и соответствующие ей касательные напряжения.

Методика измерений, как правило, предусматривает калибровку приборов на образцах, идентичных по химическому составу, термообработке и подготовке поверхности, с деталью, на которой будут проводиться измерения. Отклонения от этих требований увеличивают ошибки, и без того достаточно большие. Измерения ограничены упругими напряжениями примерно до половины предела текучести. Далее ошибки резко возрастают. Применимость преобразователей ограничена измерением разности главных напряжений. Раздельное измерение главных напряжений в настоящее время очень сложно осуществить.

Существуют преобразователи, представляющие собой комбинацию из двух-трех П-образных магнитопроводов с намагничивающими и измерительными обмотками, установленными под определенными углами друг к другу. Преобразователь магнитной анизотропии, сконструированный Анфилофьевым (рис. 18.15), содержит три П-образных магнитопровода с общей намагничивающей и раздельными измерительными обмотками; два магнитопровода расположены под прямым углом один к другому, а третий – под углом 45° или 135° к первым двум, и его измерительная обмотка включена дифференциально с измерительными обмотками первых двух магнитопроводов. Когда оси магнитопроводов 1 и 3 совпадают с направлением главных деформаций, в измерительной обмотке магнитопровода 2 индуцируется ЭДС, пропорциональная магнитной проницаемости исследуемого материала в направлении, проходящем под углом 45° по отношению к магнитопроводам 1 и 3.

18.4.2. Преобразователи с С-образным магнитопроводом

Преобразователи с С-образным магнитопроводом (рис. 18.16) экономичнее П-образных вследствие большей концентрации магнитного потока в испытуемом участке при меньшем потреблении энергии (ввиду отсутствия рассеяния в углах, как это происходит в П-образном магнитопроводе).

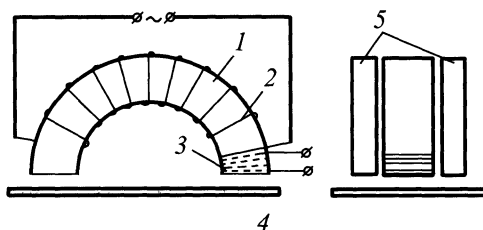


Рис. 18.16. Экранный преобразователь с С-образным магнитопроводом:

- 1, 5 – основной и боковые магнитопроводы;
- 2, 3 – намагничивающая и измерительная обмотки; 4 – испытуемый лист

Они несколько сложнее в изготовлении, а их форма предопределяет использование изотропного материала.

Помимо основного магнитопровода 1 имеются два боковых 2, которые выравнивают магнитный поток в измеряемой зоне металла.

18.4.3. Преобразователи с Т-образным, стержневым и сложным магнитопроводами

Для определения анизотропии магнитных свойств электротехнической стали используют преобразователь, который состоит из Т-образного электромагнита (рис. 18.17) с катушкой возбуждения 1, питаемой переменным током, и измерительными катушками 2 и 3, включенными встречно. Магнитный поток, выходя из полюса 5, разделяется в полосе 4 на два потока Φ_1 и Φ_2 , значения которых зависят от магнитной проницаемости в направлении полюсов 6 и 7. При повороте преобра-

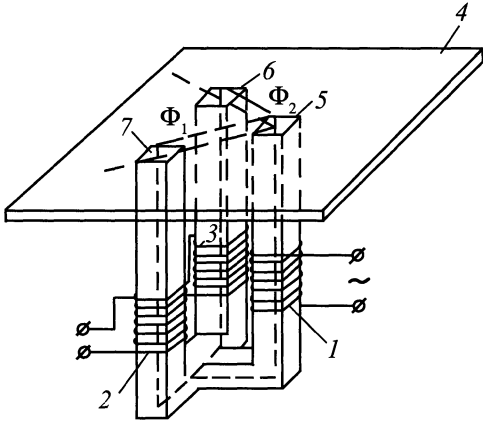


Рис. 18.17. Первичный преобразователь с Т-образным магнитопроводом

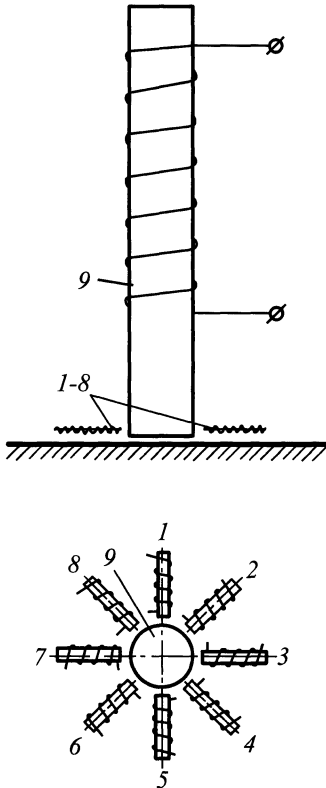


Рис. 18.18. Устройство для измерения магнитной анизотропии со стержневым магнитопроводом

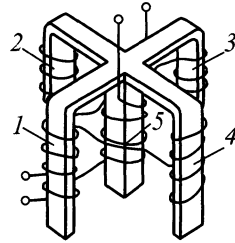


Рис. 18.19. Первичный преобразователь Максимова

зователей вокруг оси можно получить угловую зависимость магнитной индукции для электротехнической стали.

Устройство, показанное на рис. 18.18, содержит стержневой электромагнит переменного тока 9 и восемь индикаторных катушек с сердечниками 1–8. Оси катушек расположены в плоскости, перпендикулярной к оси электромагнита по радиусу и под углом 45° друг к другу, причем их выводы соединены с измерительным блоком через коммутатор. Такое расположение и включение индикаторных катушек обеспечивает детальное определение характера анизотропии без поворота преобразователя.

Преобразователь магнитной анизотропии Максимова (рис. 18.19) представляет собой пятистержневой щуп из ферромагнитного материала. На центральном стержне помещается возбуждающая обмотка 5. На остальных четырех стержнях, расположенных под углом 90° друг к другу, помещаются индикаторные обмотки. Обмотки на стержнях, лежащих на одной линии (1, 3 и 2, 4), соединены последовательно. Если обмотки на стержнях 1, 3 подключены встречно к обмоткам на стержнях 2, 4, то напряжение на выходе преобразователя будет зависеть от разности магнитных проницаемостей поверхностной зоны металла в направлении стержней 1, 3 и 2, 4, т.е. от анизотропных свойств металла.

На рис. 18.20 изображен преобразователь для измерения анизотропии Корзунина. В целях расширения функциональных возможностей преобразователь выполнен в виде четырехполюсного магнита,

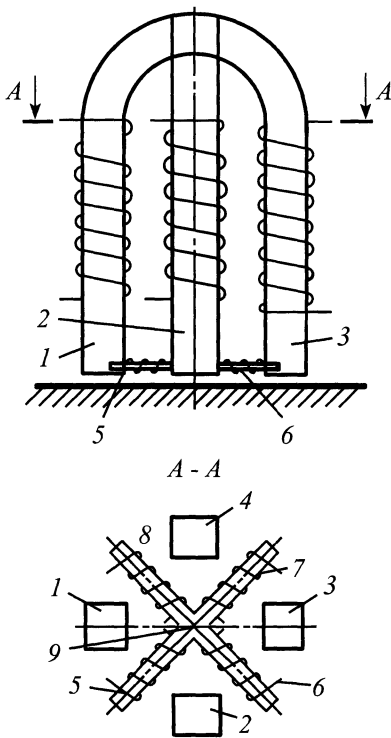


Рис. 18.20. Устройство для измерения магнитной анизотропии ферромагнитных материалов Корзунина

между полюсами 1–4 которого перпендикулярно друг к другу размещены две пары индикаторных катушек 5–8, расположенных на крестообразном сердечнике 9.

Преимуществом преобразователей с разветвленными магнитопроводами при наличии индикаторных катушек с сердечниками является их высокая чувствительность, они могут выявлять даже небольшую анизотропию магнитных свойств. Однако сложность конструкции и необходимость практически ювелирного исполнения магнитопроводов (соблюдение заданной геометрии между полюсами) ограничивают их практическое применение.

18.4.4. Вихретоковые датчики магнитной анизотропии

Вихретоковые преобразователи содержат накладные катушки (в случае плос-

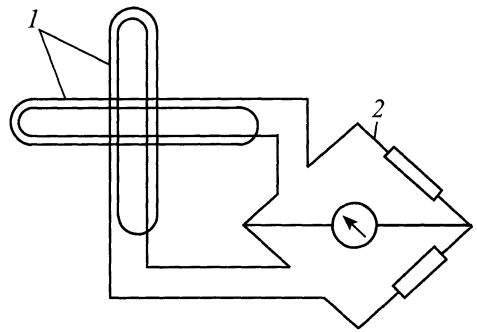


Рис. 18.21. Вихретоковый преобразователь Шеля

кого протяженного изделия). Если на поверхность металла положить плоскую круглую катушку с несколькими витками провода, то ее индуктивное сопротивление будет зависеть от магнитных свойств металла под катушкой. Такой катушкой можно измерять относительное изменение магнитных свойств поверхностной зоны металла под воздействием каких-либо факторов.

Преобразователь, изображенный на рис. 18.21, состоит из накладных вытянутых катушек. Две вытянутые катушки 1, расположенные под углом 90° одна относительно другой, прижимаются к поверхности металла. Катушки включаются в смежные плечи мостовой схемы 2, которая питается током звуковой частоты. Преимуществом вихретоковых преобразователей является отсутствие непосредственного контакта с поверхностью металла, недостатком – высокие требования к качеству поверхности.

18.4.5. Динамически вращающиеся преобразователи

Такие вращающиеся преобразователи используют для получения непрерывного во времени сигнала, характеризующего зависимость магнитных свойств материала от угла измерения. Получаемый сигнал можно рассматривать на экране осциллографа и по виду кривой судить о характере анизотропии или, используя дополнитель-

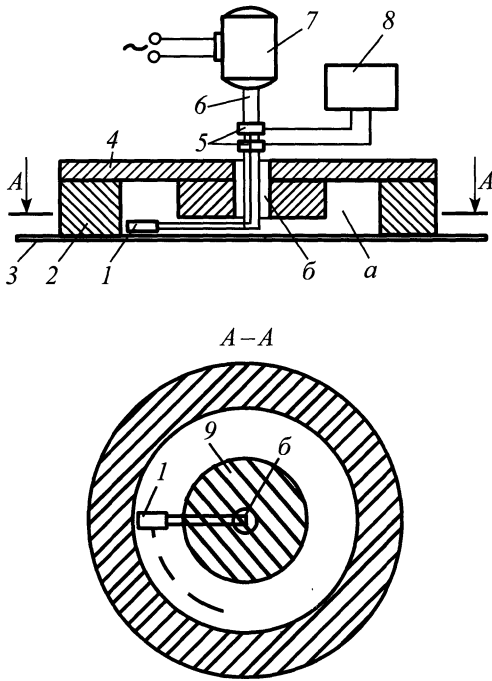


Рис. 18.22. Преобразователь с кольцевым постоянным магнитом

ные средства типа анализатора гармоник, получать более конкретную информацию о текстуре в виде амплитуд гармоник, по которым можно определить выраженность текстуры.

В качестве измерителей полезного сигнала используют индукционные катушки, устанавливаемые между полюсами намагничивающей системы или под ними таким образом, чтобы при вращении они пересекали потоки, обусловленные анизотропией, а также преобразователи Холла или феррозонды. Как правило, сигнал с измерительных элементов передается через токосъемные кольца.

Намагничивающие системы вращающихся преобразователей также весьма разнообразны. Используются магниты постоянного тока с П-образным магнитопроводом, кольцевые постоянные магниты, электромагниты с броневыми сердечниками и др.

На рис. 18.22 приведена схема устройства для определения степени совер-

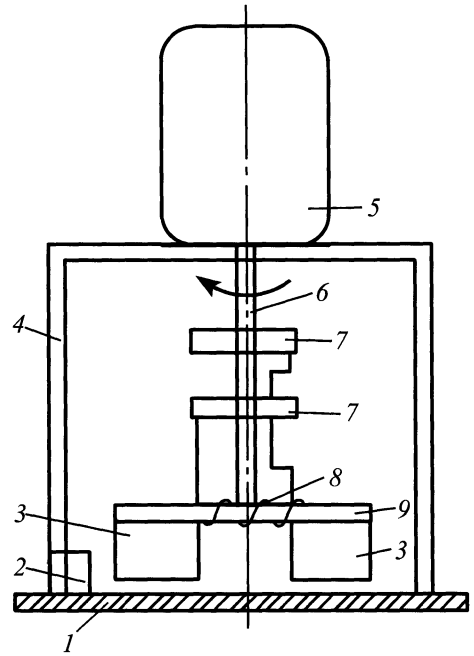


Рис. 18.23. Магнитоимпульсный преобразователь

шения кристаллографической текстуры на отдельных участках листовых магнитных материалов. Устройство состоит из кольцевого постоянного магнита 2, намагниченного вдоль оси (полюсами являются основания кольца), и магнитопровода в виде шайбы 4 с цилиндрическим выступом 9. В зазоре *a* между кольцевым постоянным магнитом и цилиндрическим выступом над поверхностью испытуемого листа 3 установлена измерительная катушка 1 так, что ее ось параллельна поверхности материала и перпендикулярна к радиусу кольцевого магнита. Через отверстие *б*, выполненное в магнитопроводе, проходит ось электродвигателя 7. На оси *б* установлены изолированные от нее токосъемные кольца 5, с которыми соединены выводы измерительной катушки 1 и через щетки – измерительный блок 8.

Преимущество этого преобразователя – отсутствие полей рассеяния, обычно возникающих при вращении несимметричной системы, недостаток – отсутствие

возможности регулировать напряженность магнитного поля в зазоре.

Приведенный на рис. 18.23 преобразователь содержит корпус 4, размещенную в нем П-образную магнитную систему, которая состоит из двух постоянных магнитов 3 из самариекобальтового сплава и соединяющего их ярма 9 из магнитомягкого материала. Ядро закреплено на валу 6 электродвигателя 5. Измерительная катушка 8 размещена на ярме намагничивающей системы и через токосъем 7 соединена с блоком измерения. На корпус соосно с намагничивающей системой установлено с возможностью поворота реперное кольцо 2. Магниты обращены к контролируемому листу 1 противоположными полюсами. Особенностью данного преобразователя является возможность с помощью реперного кольца определять ось легкого намагничивания в материале.

Оригинальная конструкция преобразователя представлена на рис. 18.24. Его магнитная система состоит из кольцевого 8 и стержневого 7 магнитопроводов и П-образного ярма 6, установленного на конце вала 5 с возможностью вращения. Намагничивающая 2 и измерительная 3 обмотки размещены на стержневом магнитопроводе и жестко соединены с кольцевым магнитопроводом, который закреплен в корпусе 4 преобразователя и цилиндрических обоямах 1.

Кроме магнитной системы в преобразователе размещены также система обес-

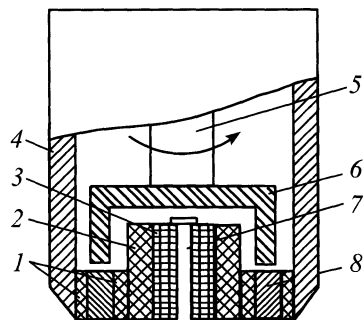


Рис. 18.24. Преобразователь с вращающимся магнитопроводом

печения вращения П-образного ярма от малогабаритного двигателя постоянного тока и система формирования опорного сигнала, включающая модулятор, источник света и фотодиод. Все системы преобразователя собраны в цилиндрическом корпусе диаметром 36 мм и высотой около 140 мм. Диаметр контактной площадки преобразователя со стороны магнитной системы составляет 25 мм. Такая конструкция преобразователя обеспечивает получение знакопеременного сигнала исследуемого материала без токосъемных колец и практически при неизменном воздушном зазоре в магнитной цепи преобразователь-изделие, что повышает точность измерений и выгодно отличает этот преобразователь от других конструкций. В качестве недостатка следует отметить сложность его изготовления.

МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТАХ

19.1. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Для исследования возможности измерения механических напряжений с необходимой точностью и локальностью измерений магнитным методом (по коэрцитивной силе H_c) разработан коэрцитивметр с малогабаритным приставным магнитным устройством (ПМУ). Размеры полюсов магнитопровода – 5×10 мм, расстояние между ними – 10 мм. Показания прибора не зависят от непостоянства зазора между изделием и ПМУ в пределах от 0 до 0,7 мм; погрешность измерения H_c составляет $\pm 0,05$ А/см в диапазоне измерений 1 ... 50 А/см. Для измерения H_c в абсолютных единицах выполняли градуирование прибора на образцах толщиной 3 ... 5 мм с известными значениями коэрцитивной силы.

Исследования проведены на сталях 10, 25, 35, 45 и конструкционных сталях, содержащих 0,07 и 0,12 % углерода, существенно различающихся по своим механическим и магнитным свойствам. Одноосное нагружение осуществляли на разрывной машине Р-5, сжатие – на той же машине с применением реверсора. Благодаря небольшим размерам преобразователя все измерения проводили на образцах с малой площадью поперечного сечения. Это позволило исследовать стали в широком диапазоне приложенных напряжений σ при максимальном усилии разрывной машины 50 кН. Размеры образцов: длина 110 мм (для сжатия – 40 мм), толщина 3 ... 5 мм, ширина 25 мм. Применение накладного преобразователя позволило измерять H_c в разных направлениях по отношению

к направлению приложения нагрузки.

Предварительные измерения коэрцитивной силы образцов при одноосном нагружении показывают, что направлениями экстремальных значений H_c являются направления 0 и 90° по отношению к прикладываемой нагрузке. Именно в этих направлениях в дальнейшем и проводят измерения H_c образцов. Одновременно записывают диаграмму нагружения и фиксируют начало пластического течения материала.

Результаты исследований по одноосному растяжению и сжатию образцов представлены на рис. 19.1 и 19.2 соответственно. Кривые $H_c(\sigma)$ построены по средним из трех измерений значениями коэрцитивной силы; сплошные линии соответствуют направлению 90° , штриховые – 0° .

В области упругих деформаций наибольшей чувствительностью к растягивающим напряжениям обладает коэрцитивная сила, измеренная в направлении 90° . В направлении приложения нагрузки (0°) на всех образцах наблюдается более или менее ярко выраженный минимум зависимости $H_c(\sigma)$. При сжатии (см. рис. 19.2) наиболее чувствительно направление 0° , а в перпендикулярном направлении H_c изменяется незначительно, причем зависимость $H_c(\sigma)$ неоднозначна.

Приращение H_c (в направлении 90° при растяжении и в направлении 0° при сжатии) в области упругих деформаций составляет десятки процентов от начального уровня. Кроме того, для всех исследуемых образцов отсутствует гистерезис характеристик $H_c(\sigma)$ в этой области. Все это позволяет использовать полученные зависимости для определения механических напряжений по коэрцитивной силе.

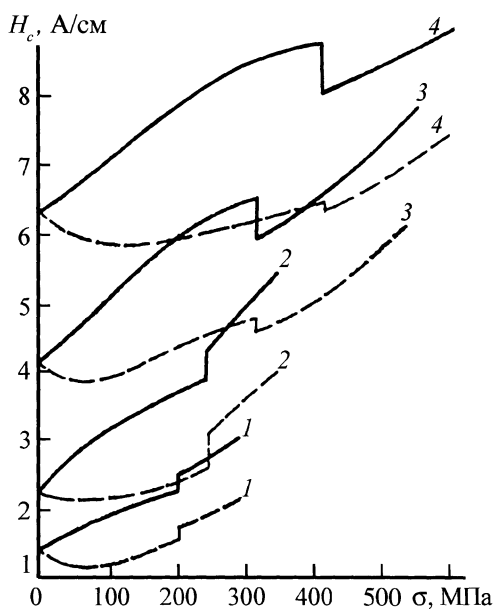


Рис. 19.1. Зависимость коэрцитивной силы от напряжений при растяжении углеродистых сталей марок 10 (1), 25 (2), 35 (3), 45 (4)

Увеличение σ в зоне временного упрочнения приводит к росту H_c по обоим направлениям. Скачок значений H_c , наблюдаемый на рис. 19.1 для всех сталей, соответствует площадке текучести на диаграмме растяжения, т.е. пределу текучести σ_T .

При исследовании характеристики $H_c(\sigma)$ в условиях разгрузки образцов из сталей 10, 35 и 45 от некоторого максимального напряжения при одноосном растяжении до $\sigma = 0$ и при повторном нагружении наблюдается идентичность характеристики. На рис. 19.3, а представлены зависимости $H_c(\sigma)$ для стали 35; стрелками показан ход кривых при первоначальном растяжении от $\sigma = 0$ (соответствующее начальное значение коэрцитивной силы H_{c_0}), уменьшений нагрузки до нуля и повторном растяжении до σ_{\max} .

При растяжении в области упругих деформаций, т.е. до $\sigma_{\max} < \sigma_T = 330$ МПа (точка a_0 на рис. 19.3, а), и последующем

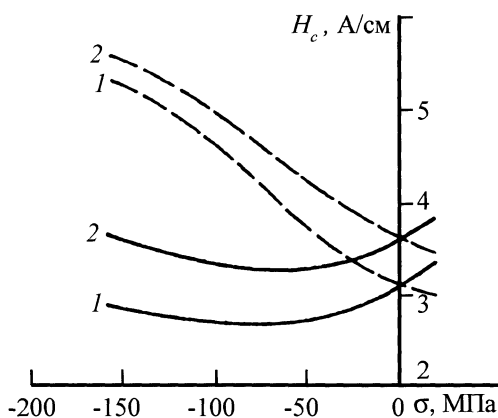


Рис. 19.2. Зависимость коэрцитивной силы от напряжений при сжатии конструкционных сталей с различным содержанием углерода:
1 – 0,07 %; 2 – 1,2 %

снятии нагрузки изменение H_c соответствует одной и той же зависимости $H_c(\sigma)$. Растяжение образца до значения σ_{\max} , лежащего в зоне временного упрочнения, т.е. при $\sigma_{\max} > \sigma_T$ (точки A_1, A_2, A_3 на рис. 19.3, а), приводит к появлению значительного гистерезиса. Превышение σ_{\max} над пределом текучести σ_T на 25 МПа приводит к увеличению H_c в разгруженном состоянии в направлении 0° на 75 %, в направлении 90° – почти на 25 %.

При повторном нагружении (штриховые линии) кривые $H_c(\sigma)$ идут ниже кривых разгрузки на всем участке от нуля до σ_{\max} , но замыкаются в крайних точках, образуя петлю. Эта петля остается неизменной при многократном нагружении в данном диапазоне напряжений. Если проводить нагружение образца в меньших пределах – при $0 < \sigma < \sigma_{\max}$, то зависимость $H_c(\sigma)$ имеет вид внутренней петли.

Увеличение степени пластической деформации, а значит, и уровня остаточных напряжений после разгрузки, приводит к смещению петлеобразных характеристик $H_c(\sigma)$ в направлении больших значений коэрцитивной силы. При этом наблюдается однозначная связь между мак-

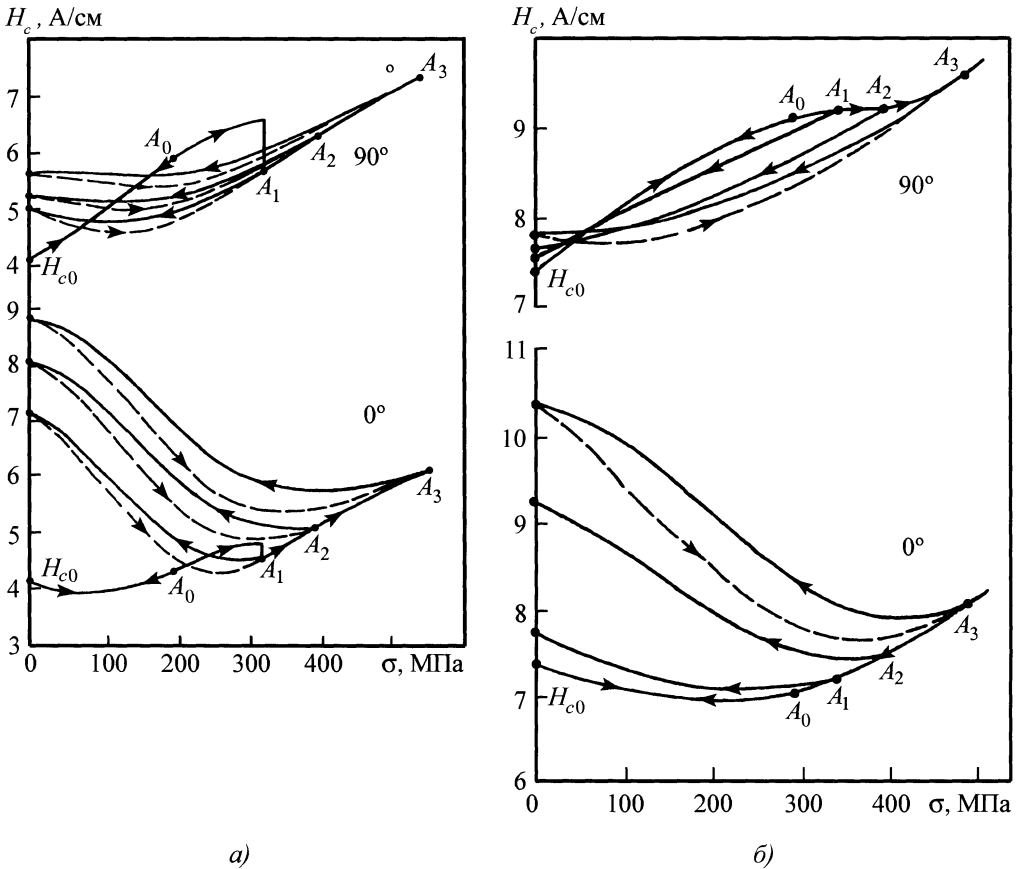


Рис. 19.3. Зависимость коэрцитивной силы углеродистых сталей 35 (а) и 45 (б) от растягивающих напряжений при циклическом нагружении в зоне временного упрочнения

симальным напряжением σ_{\max} в цикле и значением H_c в разгруженном состоянии. Это свидетельствует о том, что возможен контроль остаточных напряжений по коэрцитивной силе. Для количественной оценки необходимы прямые измерения остаточных напряжений, например, рентгеновским методом. Их сравнение с результатами измерения H_c позволит получить градуировочные зависимости между остаточными напряжениями и коэрцитивной силой.

Гистерезис зависимости $H_c(\sigma)$ является одновременно с возникновением остаточных деформаций в образце до на-

ступления общей текучести. Однако для сталей с ярко выраженной площадкой текучести не удастся получить семейство петель гистерезиса, соответствующее переходной области между зоной упругости и зоной упрочнения.

Наличие площадки текучести для некоторых материалов не является характерным. Например, сталь 45, прошедшая операцию улучшения (закалка и высокий отпуск), не имеет площадки текучести на диаграмме растяжения и соответственно скачка зависимости $H_c(\sigma)$, как это видно на рис. 19.3, б. О начале пластической деформации в данном случае можно судить

по появлению гистерезиса H_c . Рост коэрцитивной силы такого образца в разгруженном состоянии после предварительного нагружения до $\sigma_{\max} \geq \sigma_T$ (для рассматриваемого случая $\sigma_T \approx 300$ МПа; точка A_0 на рис. 19.3, б) происходит плавно, начиная с предела упругости (разгрузка от точек A_1, A_2, A_3).

Часто в процессе эксплуатации металлических конструкции подвергаются воздействию двухосных (плоских) нагрузок, поэтому распространение известных методик определения σ на плоское напряженное состояние имеет большое практическое значение.

Исследование влияния двухосных нагрузок на коэрцитивную силу углеродистых сталей проведено с использованием крестообразных образцов из стали 45 размером 80×80 мм с шириной "крыльев" 30 мм.

Непосредственное определение напряжений по значению прикладываемых усилий при двухосном нагружении во многих случаях невозможно, поэтому для характеристики напряженного состояния использованы главные деформации – наибольшая $\hat{\epsilon}$ и наименьшая $\check{\epsilon}$, однозначно связанные с главными напряжениями $\hat{\sigma}$ и $\check{\sigma}$. Коэрцитивную силу измеряли в двух направлениях, совпадающих с направлениями главных деформаций, которые, в свою очередь, определяли по изменению сопротивления тензометрических преобразователей. Преобразователи располагали по обеим сторонам образца, что позволяет следить за равномерностью деформации образца по толщине в процессе нагружения. Все измерения проводили в области упругих деформаций.

Зависимости $H_c(\hat{\epsilon})$ стали 45 для разных значений отношения главных деформаций $n = \check{\epsilon} / \hat{\epsilon}$ представлены на рис. 19.14.

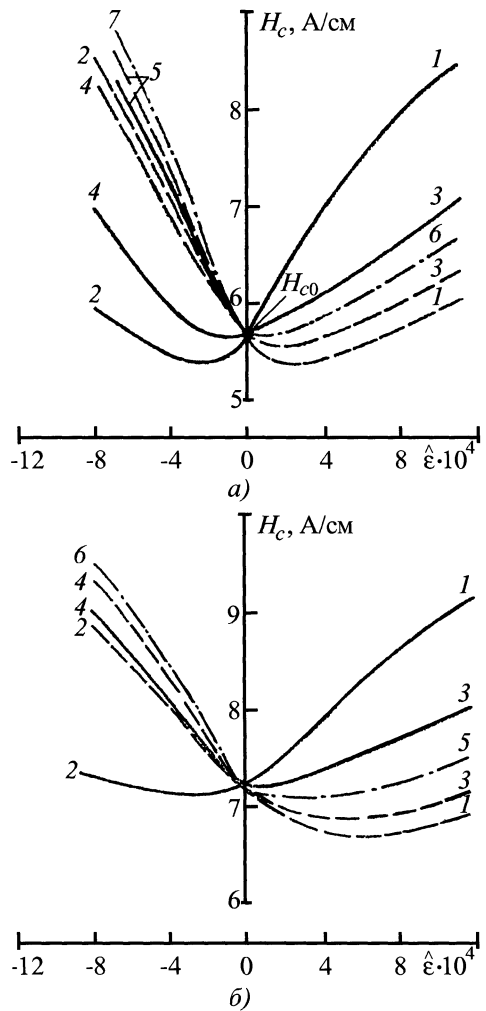


Рис. 19.4. Зависимость коэрцитивной силы стали 45 от наибольшей главной деформации в условиях двухосного растяжения и сжатия при разном отношении главных деформаций n :

- a – в состоянии поставки при $n = -0,35$ (1), $-0,4$ (2), $0,5$ (3), $0,6$ (4), $0,7$ (5), $1,06$ (6);
- b – после отжига при 800°C в течение 3 ч при $n = -0,5$ (1), $-0,4$ (2), $0,55$ (3), $0,3$ (4), $0,8$ (5), $1,0$ (6)

Сплошные линии соответствуют направлению наименьшей главной деформации $\check{\epsilon}$, штриховые – направлению наибольшей главной деформации $\hat{\epsilon}$, штрихпунк-

тирные кривые получены при $n = 1$ (симметричное нагружение). Из сравнения кривых следует, что коэрцитивная сила более мягкого (отожженного) образца обладает большей по сравнению с "сырым" образцом чувствительностью к механическим напряжениям.

Отметим некоторые особенности изменения H_c при двухосном нагружении с изменением отношения главных деформаций n . Увеличение n от предельного случая $n = -1$, т.е. нагружение одинаковыми по значению, но различными по знаку нагрузками (на рис. 19.4 зависимости, соответствующие этому случаю, не показаны ввиду отсутствия экспериментальных данных), до $n = 1$ при растяжении приводит к сближению кривых $H_c(\hat{\varepsilon})$, измеренных в направлении $\hat{\varepsilon}$ и $\hat{\varepsilon}$, которые сливаются в одну кривую при $n = 1$. Более чувствительна к изменению n коэрцитивная сила, измеренная в направлении $\hat{\varepsilon}$.

Иначе выглядит зависимость $H_c(\hat{\varepsilon})$ при двухосном сжатии. В этом случае кривая $H_c(\hat{\varepsilon})$ при $n = 1$ идет выше аналогичных характеристик для всех других значений n . Так же, как и при растяжении, большие изменения претерпевают зависимости $H_c(\hat{\varepsilon})$ в направлении $\hat{\varepsilon}$, а H_c , измеренная в направлении $\hat{\varepsilon}$, с увеличением n меняется незначительно.

Как следует из анализа, при двухосном растяжении направление наибольшей главной деформации $\hat{\varepsilon}$ совпадает с направлением, в котором коэрцитивная сила нагруженного изделия минимальна, а направление наименьшей главной деформации $\hat{\varepsilon}$ — с направлением максимальной коэрцитивной силы. При двухосном сжатии углеродистых сталей наблюдается обратная зависимость.

Аналогичные характеристики получены для образцов из стали 45, прошедших закалку и отпуск при разных температурах.

Измерение H_c в различных направлениях позволяет определить значение и направление (при известном знаке) главных напряжений. Взаимно перпендикулярные направления, по которым H_c принимает экстремальные значения, являются главными, а главные напряжения (деформации) можно определить по значению H_c изделия до нагружения H_{c0} и по значениям коэрцитивной силы, измеренным по главным направлениям в нагруженном состоянии с использованием градуировочных характеристик.

19.2. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ (ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ) ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОДЪЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ И СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В отношении большинства объектов повышенной опасности (подъемные краны, лифты, сосуды, котлы и т.п.) остро стоит проблема определения остаточного ресурса несущих металлоконструкций при продлении их срока эксплуатации. В значительной мере задача объективной оценки состояния металлоконструкций решается уже сейчас с помощью магнитного контроля по коэрцитивной силе.

Нормативной базой магнитного метода контроля металлоконструкций из ферромагнитных сталей служат ГОСТ 30415–96, Международный стандарт ИСО 4301 и Методические указания Госгортехнадзора России (РД ИКЦ "Кран" 007–97).

Эксплуатационные дефекты обычно возникают и зарождаются уже на завершающей стадии "жизни" металла, тогда как предваряющие эту стадию усталостные изменения развиваются и накаплива-

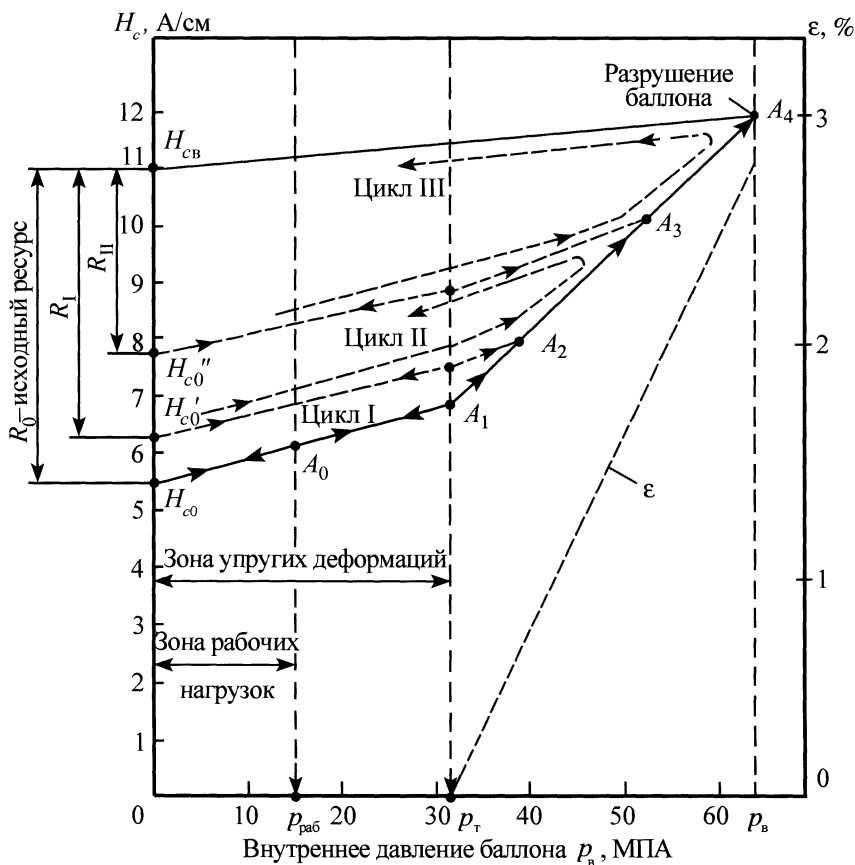


Рис. 19.5. Обобщенная предельная характеристика нагружения образца из металла (готового изделия)

ются медленно, долго и постепенно, причем в течение самого продуктивного этапа эксплуатации. Эти процессы идут с явным опережением в зонах концентрации напряжений. Сами эти зоны велики по размерам, их местонахождение хорошо известно уже при конструировании оборудования. Поэтому усталостные изменения существенно проще выявлять и легче измерять, но при условии, что найден эффективный параметр контроля. К тому же, при такой постановке задачи момент зарождения эксплуатационных дефектов предупреждается, что также немаловажно с точки зрения стратегических принципов и акцентов диагностики. Очевидно, что аварии оборудования всегда легче и де-

шевле предупредить, чем ликвидировать.

Для эксплуатационного контроля в целях получения количественной и качественной оценки усталостных изменений, включая оценку остаточного ресурса оборудования, из всех магнитных характеристик наиболее пригодным параметром является коэрцитивная сила H_c . Приведем основные положения этого метода. Так, на рис. 19.5 показана обобщенная предельная характеристика нагружения образца из металла или готового изделия (точки H_{c0} , A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4). В данном случае – это промышленный газовый баллон высокого давления по ГОСТ 949–73. Нагружение

19.1. Механические и магнитные характеристики листов толщиной 5 ... 15 мм из конструкционных сталей

Марка стали	σ_T , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Коэрцитивная сила H_c , А/см			
				H_{c0}	H_{ct}	H_{cb}	$H_{c/N}$
Сталь 3	350	210	22	2,5	5,0	6,0	5,8
Ст3сп5	400	240	25	3,0	5,5	6,5	5,9
09Г2С	450	310	20	4,0	7,8	10,5	10,5
ЮХСНД	540	400	19	5,0	11,5	14,5	13,5
Сталь 20	420	260	24	4,5	10,5	13,5	13,0
Сталь ДС	600 ... 650	350 ... 400	15	5,0 ... 6,0	8,0 ... 8,5	10,0 ... 11,0	9,5 ... 10,5
17Г1С	520	350	2	4,0	10,0	14,0	14,0

выполняют на испытательном стенде начиная от состояния поставки – точка H_{c0} и до его разрушения – точка A_4 ; $p_{\text{раб}}$ – рабочее давление баллона, p_T и p_B – давление на пределе текучести и пределе прочности. Видно, что разрушить изделие можно однократным непрерывным нарастающим нагружением либо многократными циклами с заданной или нарастающей амплитудой нагружения (режим малоциклового усталости). На рис. 19.5 таких нарастающих циклов условно показано три (I–III). Коэрцитивная сила металла контролируемого изделия является надежным "свидетелем" перегрузки оболочки сверх предела текучести, а также наглядным мерилем степени исчерпания исходного ресурса R_0 в процессе статических и циклических нагружений. Таким образом решена задача поиска эффективного параметра контроля усталостных процессов, поскольку в ходе продвижения металла от состояния поставки до состояния предразрушения ($H_{c0} \rightarrow H_{cb}$) значение коэрцитивной силы H_c возрастает в 2-3 раза (в зависимости от марки металла).

На основе коэрцитиметрии можно оценить степень исчерпания исходного ресурса, можно также оценить и остаточ-

ный ресурс R_i , но только при известном режиме эксплуатации.

Методика магнитной диагностики основывается на корреляционных зависимостях между физико-механическими свойствами ферромагнитных материалов и значением коэрцитивной силы H_c (А/см), контролируемой при статических и усталостных испытаниях на всех стадиях нагружения, вплоть до разрушения. Теоретические исследования на основе энергетического подхода к анализу намагничивания металла, упругопластической деформации, накопления повреждений и роста коэрцитивной силы позволяют моделировать на образцах процесс нагружения металла при эксплуатации в условиях сложнонапряженного состояния. В сочетании с натурными испытаниями метод подобия позволяет определить базовые параметры для контроля состояния металла по значениям коэрцитивной силы, соответствующих пределу текучести H_{ct} , пределу прочности H_{cb} и пределу выносливости H_{cN} с учетом анизотропии механических свойств сталей и сплавов (табл. 19.1).

На рис. 19.6 показаны зависимости между коэрцитивной силой H_c и действу-

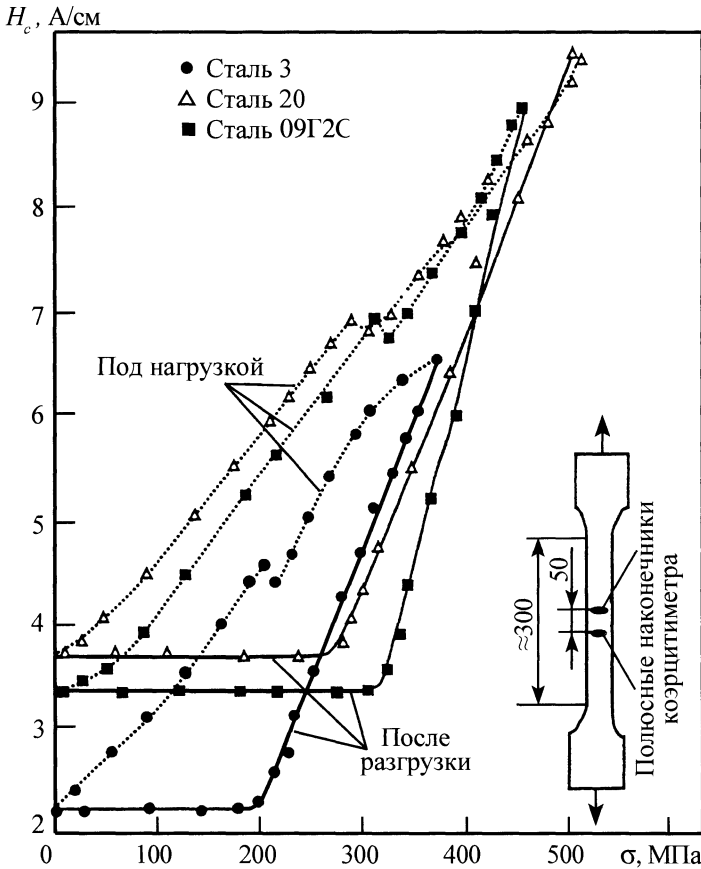


Рис. 19.6. Кривые, полученные при магнитном контроле плоских стальных образцов в условиях растяжения (с регистрацией значений по коэрцитиметру непосредственно под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения)

ющими напряжениями σ при статическом растяжении плоских образцов из конструкционных сталей. При непрерывном растяжении стандартных образцов толщиной 5 ... 10 мм в упругой области кривой нагружения коэрцитивная сила возрастает до значения, пропорционального приложенному напряжению вплоть до предела текучести σ_T . На зависимости $H_c(\sigma)$ наблюдается небольшая площадка, или "зуб" текучести. При повышении нагрузки в области необратимых деформаций продолжается рост H_c одновременно с активным накоплением повреждений в металле. Упрочнение металла на стадии предраз-

рушения вызывает рост H_c до максимальных значений (в зависимости от марки стали) и сопровождается появлением хрупких микротрещин на стыках и границах зерен. После образования и раскрытия магистральной трещины происходит частичное снятие напряжений в зоне развития трещины и снижения значения H_c . Максимальные значения $H_{cв}$ соответствуют пределу прочности металла σ_b .

При ступенчатом нагружении и измерении H_c после разгрузки образца, когда магнитный параметр реагирует только на остаточные внутренние напряжения и деформации, в упругой области значение H_c

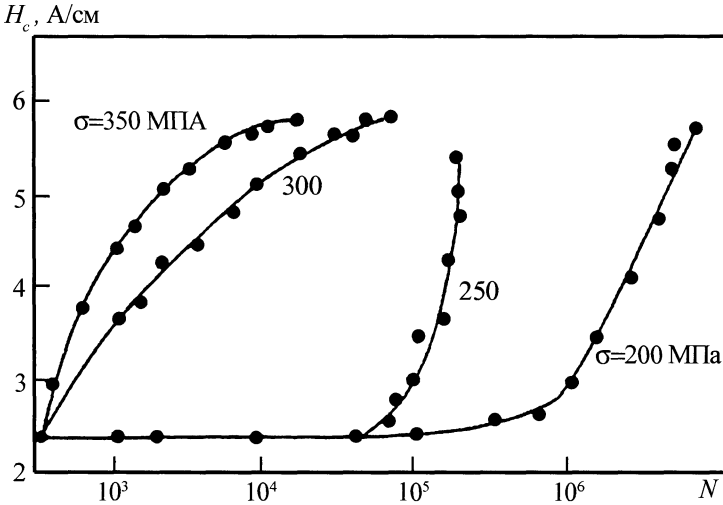


Рис. 19.7. Кривые, полученные при магнитном контроле сопротивления малоцикловому усталостному разрушению листов из стали СтЗсп5 ($H_{c\text{кр}} = 6 \text{ А/см}$)

остается постоянным, равным исходному значению H_{c0} , а после достижения предела текучести растет по линейному закону.

Энергетический подход правомерен и при анализе усталостного разрушения металла. На рис. 19.7 представлены результаты циклического нагружения плоских образцов из стали СтЗсп5. Испытания проводили при отнулевом цикле с амплитудой, моделирующей легкий, умеренный и тяжелый режимы работы металлоконструкций подъемных кранов по классификации ИСО 4301. Это означает, что с позиции статического растяжения металл испытывали в начале упругой области кривой нагружения при $\sigma < \sigma_{0,2}$ – легкий режим, потом в области упругопластических деформаций при $\sigma \leq \sigma_{0,2}$ – умеренный режим, а затем при $\sigma > \sigma_{0,2}$ – тяжелый режим нагружения.

На основании результатов циклических и статических испытаний образцов конструкционных сталей подготовлены номограммы для оценки реального остаточного ресурса несущих металлоконструкций, работающих в условиях малоциклового усталости.

Номограммы, представленные на рис. 19.8, построены по результатам измерения коэрцитивной силы H_c в процессе испытаний на усталость плоских образцов толщиной 5 ... 20 мм из сталей СтЗсп5 и 09Г2С, используемых в краностроении. Испытания проводили с учетом класса использования и режима нагружения кранов, установленных Международным стандартом ИСО 4301. За основу выбраны наиболее распространенные режимы: умеренный Q_2 ($K_p = 0,25$) и тяжелый Q_3 ($K_p = 0,5$) и класс использования соответственно I_3 ($N_{\text{max}} = 1,25 \cdot 10^5$ циклов) и I_7 ($N_{\text{max}} = 2 \cdot 10^6$ циклов).

Статистическая обработка результатов испытаний позволяет построить экспериментальные зависимости $H_c(N)$ от первых циклов нагружения до разрушения металла. С учетом различия между физическими и рабочими циклами нагружения для удобства оценки состояния кранов и продления сроков эксплуатации в номограммах может быть предусмотрена дополнительная шкала – рабочие смены $S_{\text{см}}$. При использовании такой шкалы определение остаточного ресурса и продления

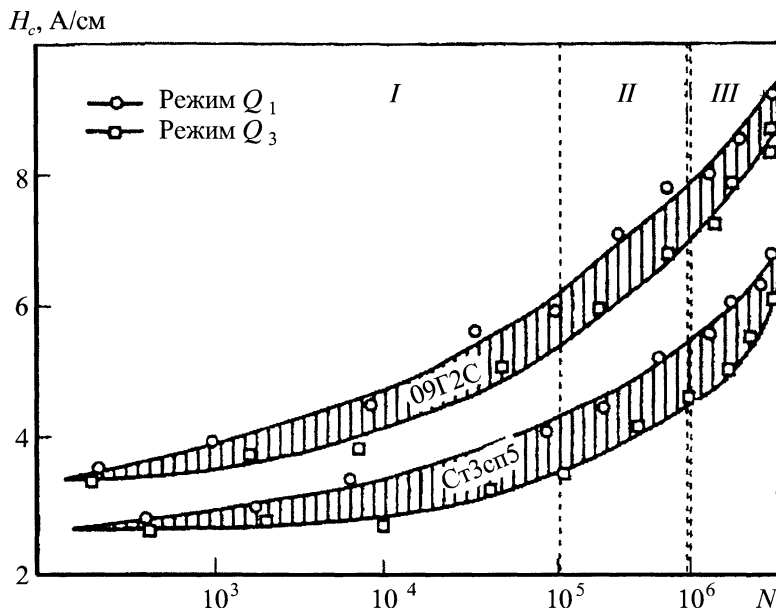


Рис. 19.8. Номограммы для магнитного контроля остаточного ресурса металлоконструкций подъемных сооружений

срока дальнейшей эксплуатации кранов значительно упрощается.

Как видно на рис. 19.8, весь период работы металлоконструкции можно разделить на три этапа, определяемых стадиями нагружения металла на кривой σ - ϵ (напряжение-деформация). Соответственно им установлены режимы эксплуатации кранов в зависимости от значения коэрцитивной силы:

I – режим надежной эксплуатации, при котором все несущие элементы работают в упругой области, анизотропия и концентрация внутренних напряжений менее 25 %. С позиции механики разрушения такая конструкция может продолжать работать в том же режиме более 1500 смен (свыше трех лет).

II – режим контролируемой эксплуатации, при котором отдельные элементы (или зоны) работают в упругопластической области, а остальные – в упругой. Анизотропия свойств и концентрация напряжений достигают 50 %. Кран можно

эксплуатировать в том же режиме нагружения не более 1000 смен, т.е. обследование должно производиться не позднее чем через два года.

III – критический режим эксплуатации, при котором отдельные элементы или участки несущей конструкции крана работают в пластической области, а металлоконструкция в целом – в упругопластической и упругой областях. В наиболее нагруженных зонах в местах концентрации напряжений возникают микро- и макротрещины. Анизотропия и концентрация напряжений достигают 75 ... 100 %. Сварные соединения несущих элементов крана подлежат УЗ-контролю, а зоны, попавшие в пластическую область, – усилению. Элементы, для которых H_c достигла значений H_{ct} и H_{cv} и в которых образовались трещины, подлежат ремонту в спецорганизации. При переходе главных или концевых балок целиком в стадию, называемую "пластический шарнир" (по всему сечению $H_c > H_{ct}$), кран подлежит списанию.

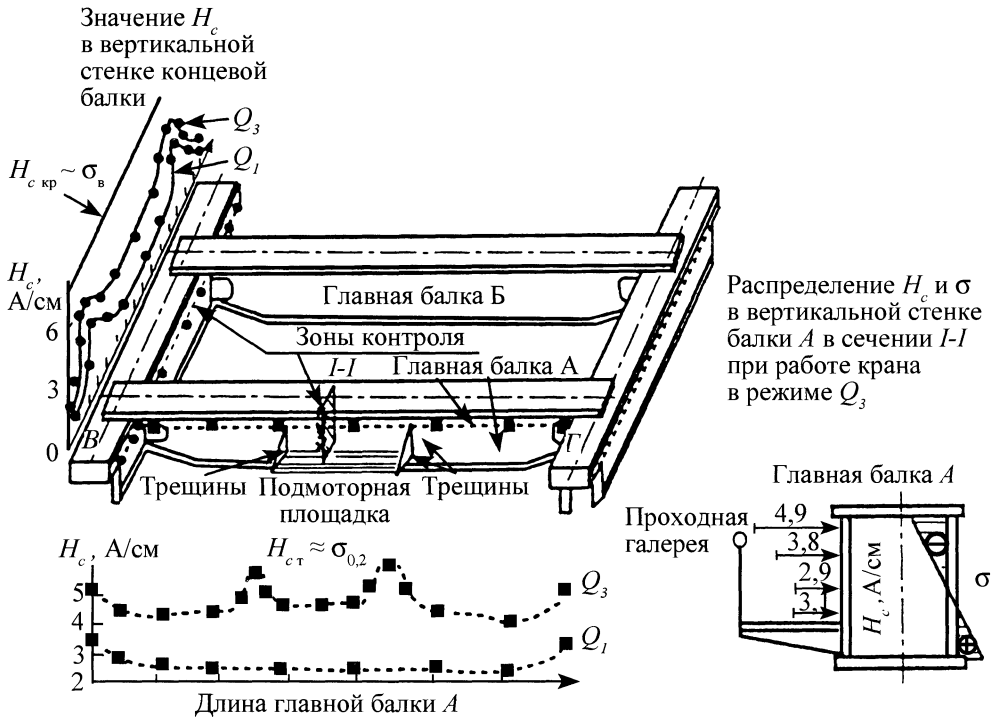


Рис. 19.9. Магнитный контроль концевых и главных балок двух однотипных мостовых кранов, отработавших 20 лет в легком (Q_1) и тяжелом (Q_3) режимах

Для общей оценки состояния металлоконструкций подъемных сооружений при обследовании и техническом диагностировании достаточно проанализировать распределение значений H_c (A/cm), выявить наиболее нагруженные элементы ($H_{c\text{max}}$) и сравнить эти значения со значениями H_{c0} , $H_{cт}$, $H_{cв}$, соответствующими пределам текучести и прочности для марки стали, из которой изготовлены несущие элементы. Сопоставив средние H_c и максимальные $H_{c\text{max}}$ значения коэрцитивной силы с усталостными номограммами для соответствующих режима нагружения и марки стали, можно сделать вывод о реальном остаточном ресурсе подъемного сооружения.

Примером практического использования методики могут служить результаты магнитного контроля состояния двух однотипных мостовых кранов грузоподъем-

ностью 10 т, отработавших 20 лет в легких (Q_1) и тяжелых (Q_3) режимах по классификации ИСО 4301. Значение H_c определяли в наиболее нагруженных зонах нижнего пояса, а также в вертикальных стенках главных и концевых балок (рис. 19.9). Метод позволил выявить места наибольшей концентрации напряжений в зонах сварных соединений главных и концевых балок, а также в буксовых зонах концевых балок. При этом для крана, отработавшего 20 лет в тяжелом режиме, максимальные значения H_c в 1,7 раза больше, а для вертикальных стенок балок наблюдаются частичная потеря устойчивости и снижение остаточного ресурса до 15 %.

При эксплуатации металлические конструкции, как правило, работают в условиях сложнапряженного состояния. Однако магнитный контроль вдоль направления действия главных напряжений (деформаций) позволяет определить уро-

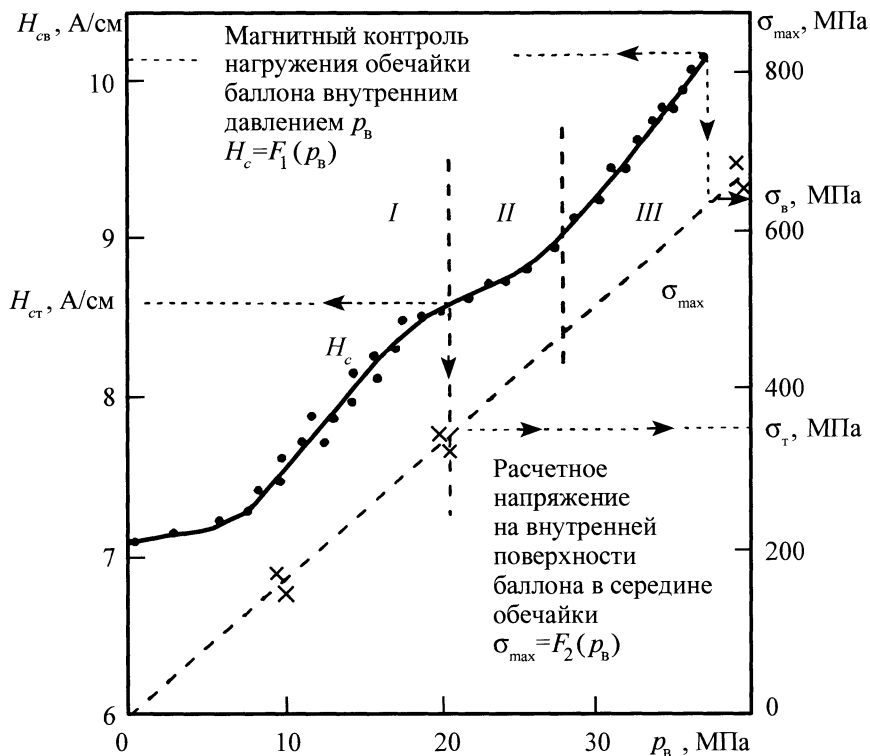


Рис. 19.10. Магнитный контроль напряженного состояния кислородного баллона при нагружении давлением p_B до разрушения

вень максимальных действующих внутренних напряжений, а с учетом реального режима нагружения можно оценить и остаточный ресурс отдельных несущих элементов и всей металлоконструкции в целом. Общий подход к оценке магнитным методом напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса объектов повышенной опасности в реальных условиях рассмотрим на примере кислородных баллонов и мостовых кранов.

Внутренние напряжения в стенках кислородных баллонов легко рассчитать, если известны внутреннее давление и

толщина стенок. При нагружении баллона внутренним давлением воды p_B до разрушения можно напрямую связать уровень максимальных действующих напряжений σ_{\max} со значениями коэрцитивной силы H_c и построить зависимость, приведенную на рис. 19.10.

Зависимость $H_c(p_B)$ во многом повторяет классическую диаграмму $\sigma(\epsilon)$ при растяжении стальных образцов. На кривой $H_c(p_B)$ можно выделить участок упругости (I), зону упругопластических деформаций (II) и стадию упрочнения с последующим разрушением (III).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абакумов А.А.** Магнитная диагностика газонефтепроводов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 440 с.
2. **Вонсовский С.В.** Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, анти- ферромагнетиков. М.: Наука, 1971. 1032 с.
3. **Вонсовский С.В.** Магнетизм микрочастиц. М.: Наука, 1973. 279 с.
4. **Зацепин Н.Н.** Метод высших гармоник в неразрушающем контроле. Минск: Наука и техника, 1980. 168 с.
5. **Зацепин Н.Н., Коржова Л.В.** Магнитная дефектоскопия. Минск: Наука и техника, 2001. 230 с.
6. **Корзунин Г.С.** Магнитные методы определения кристаллографической текстуры. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 127 с.
7. **Машиностроение:** Энциклопедия: В 40 т. Т. IV-3. Надежность машин / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1998. 592 с.
8. **Мельгуй М.А.** Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника. 1980. 184 с.
9. **Михайлов С.П., Щербинин В.Е.** Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 240 с.
10. **Михеев М.Н., Горкунов Э.С.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
11. **Неразрушающий контроль и диагностика:** Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
12. **Неразрушающий контроль металлов и изделий:** Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2. 456 с.
13. **Новиков В.Ф., Бахарев М.С.** Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Вектор Бук, 2001. 220 с.
14. **Филинов В.В.** Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитно-акустических шумов. М.: Машиностроение, 2000. 154 с.
15. **Хусанов М.Х.** Магнитографический контроль сварных швов. М.: Недра, 1973. 230 с.
16. **Шарова А.М.** Контроль качества сварки магнитографическим методом. Минск: Вышэйш. шк., 1979. 120 с.
17. **Щербинин В.Е., Горкунов Э.С.** Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. НАЦИОНАЛЬНЫЕ И МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ ПО СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО МАГНИТНОМУ КОНТРОЛЮ

1. Общие сведения

Назначение и основные определения. Американские нормы (инструкция SNT-TC-1A) были сформулированы в конце 1960-х годов и в настоящее время широко используются в США, Европе и Азии. Работа по созданию международного стандарта ИСО 9712 по сертификации специалистов НК, начатая в середине 1980-х годов была завершена в 1991 г. Новый европейский стандарт EN 473, описывающий систему сертификации персонала, проводящего НК, принятый в 1993 г., включил в себя большую часть содержания ИСО-9712, и его нормы в области подготовки и сертификации специалистов считаются обязательными в 18 странах Европы.

Современные экономические отношения в мире и, в частности, между США, странами ЕС и Российской Федерацией требуют гармонизации аттестационных критериев по отношению к квалификации специалистов НК, поэтому знание международных норм необходимо специалистам промышленных предприятий.

Приведем ряд определений, принятых в инструкции SNT-TC-1A, стандартах ИСО 9712 и EN 473.

Квалификация – это подтверждение образования, специальных знаний, навыков, опыта и физической пригодности, позволяющих персоналу технически грамотно проводить НК.

Сертификация на соответствие – процесс, предназначенный для подтверждения квалификации специалистов по НК при работе их в определенном секторе промышленности, который завершается выдачей удостоверения компетентности (сертификата, свидетельства).

Система сертификации – система, которая имеет свои собственные правила технологического процесса по осуществлению сертификации на соответствие.

Удостоверение (сертификат) – документ, выданный в соответствии с нормами аттестационной системы и удостоверяющий, что данный специалист является компетентным в выполнении определенных работ.

Кандидат на сертификацию – это лицо, ходатайствующее о сертификации и работающее под контролем аттестованного персонала в целях накопления опыта, необходимого для получения данной квалификации. Кандидаты могут работать самостоятельно.

Независимый сертификационный орган (сертифицирующая инстанция) – орган, который проводит сертификацию персонала на соответствие.

Уполномоченный орган – орган, уполномоченный независимым сертифицирующим органом подготавливать кандидатов и проводить экзамены по квалификации персонала.

Экзаменационный центр – центр, который признан непосредственно независимым сертифицирующим органом или через уполномоченный орган и предназначен для проведения квалификационных экзаменов. Экзаменационный центр может находиться в ведении работодателя (предприятие, в котором работает кандидат).

Квалификационный экзамен – экзамен, который принимают представители независимого сертифицирующего органа или уполномоченного органа и который выявляет общие и специальные знания, а также практические навыки кандидатов.

Промышленный сектор – это определенная отрасль промышленности или вид техники, где необходимы специалисты по НК. Промышленный сектор может относиться к ОК (сварное соединение, отливка и т.п.) или отрасли промышленности (авиация, нефтехимия).

Лицам, аттестуемым согласно американским и европейским нормам, в соответствии с их квалификацией присваивается один из трех уровней (разрядов).

I уровень. Лицо, аттестуемое по I уровню, должно иметь квалификацию, позволяющую проводить НК по инструкции под контролем персонала II и III уровней. Специалист этого уровня должен: а) настраивать и регулировать приборы; б) проводить НК; в) записывать результаты контроля и оценивать их на основании заданных критериев; г) составлять отчет о полученных результатах.

Специалист I уровня не может отвечать ни за выбор метода, средств НК, ни за оценку результатов НК.

II уровень. Специалист, аттестованный по II уровню, должен иметь квалификацию, позволяющую руководить НК по утвержденным инструкциям. Он должен: а) правильно выбирать средства для проведения НК; б) знать возможности того или иного метода НК; в) понимать стандарты по НК и правила контроля (специализации), относящиеся к практике его работы; г) налаживать приборы; д) осуществлять контроль и наблюдение за ним; е) представлять результаты НК и проводить их оценку по стандартам, другим нормативным документам и правилам контроля (ПК); ж) составлять письменные инструкции по НК; з) выполнять и контролировать всю работу специалистов I уровня; и) документировать результаты НК.

Здесь и далее под *инструкцией* понимается письменное описание последовательных этапов проведения НК согласно нормативным документам, а под ПК (*спецификацией*) – письменное описание всех основных параметров и операций, которых необходимо придерживаться при выполнении НК, соблюдая нормативы и стандарты.

III уровень. Специалист, аттестованный по III уровню, должен уметь управлять любой работой в НК. Он, в частности, не-

сет ответственность за персонал и выбор средств для проведения НК, использование и совершенствование этих средств, за разработку стандартов, спецификаций и инструкций. Специалист III уровня должен: а) давать правильную оценку и интерпретацию результатов НК; б) знать возможности различных методов НК и использовать их для контроля продукции; в) руководить работой персонала с уровнями ниже III; иметь достаточный практический опыт работы с используемыми в современном производстве материалами и технологиями изготовления изделий с тем, чтобы правильно выбрать метод НК, усовершенствовать технику и содействовать составлению критериев годности продукции.

В соответствии с указанными национальными и международными нормами по сертификации персонала в НК квалификацию специалиста определяют на основании пяти признаков:

- наличия профессионального образования;
- достаточного практического опыта работы в НК;
- физической пригодности;
- прохождения курса обучения;
- сдачи квалификационных экзаменов.

Для каждого из этих признаков в отношении метода проверки и уровня квалификации устанавливаются минимальные требования, например, по продолжительности практической работы по конкретному виду НК, сроку обучения (для I и II уровней), минимальному количеству вопросов на квалификационном экзамене и минимальному результату, которого необходимо достичь на экзамене. При выполнении этих условий специалист может рассчитывать на подтверждение достигнутой квалификации.

Все известные важнейшие нормы сертификации персонала практически совпадают по требованиям к признакам квалификации, но расходятся в определении сертифицирующей инструкции.

Американские нормы согласно инструкции SNT-TC-1A определяют для лица (кандидата), подлежащего сертификации, предприятие* (работодателя) в качестве сертифицирующей инстанции.

Европейские нормы по EN 473 и международный стандарт ИСО 9712 в качестве сертифицирующей инстанции определяют внепроизводственный сертифицирующий орган.

Сертификация предприятия имеет наибольшее распространение в мире, и соглашения по ней до настоящего времени осуществляются по контрактам между изготовителем и заказчиком в таких отраслях промышленности, как авиационная, машиностроительная и т.п. Это обусловлено следующими причинами.

1. Для предприятий, у которых заказчик требует сертификаты на персонал, проще и дешевле проводить сертификацию непосредственно на предприятии.

2. Сертификация на предприятии тесно связана с практической работой специалиста на конкретном рабочем месте. Например, если для просвечивания ОК на предприятии используется только рентгеновская техника, нет необходимости обучать персонал работе с гамма-дефектоскопами.

К предприятию (работодателю) как к сертифицирующей инстанции предъявляются два важных требования. Оно должно:

1) письменно изложить свою программу сертификации, т.е. составить так называемое "written practice";

2) располагать персоналом для проведения сертификации, т.е. иметь по крайней мере одного экзаменатора с III уровнем квалификации.

Сертифицирующая инстанция согласно евростандарту должна иметь руководителя и компетентный персонал для

выполнения своих задач. Она должна описать собственную систему сертификации в своем стандарте (вместо "written practice") и располагать документированной системой обеспечения качества, которая излагается в руководстве по обеспечению качества.

Хотя согласно EN 473 выдача сертификата осуществляется вне предприятия, отнюдь не верно заключение, что работодатель исключается из процесса сертификации. Чтобы выдать компетентное заключение, сертифицирующей инстанции приходится сотрудничать с работодателем, который по меньшей мере должен дать подтверждение о профессиональном опыте и физической пригодности кандидата. Кроме того, сертификат, полученный вне предприятия, автоматически не дает права использовать специалиста на предприятии по соответствующему профилю, что имеет место при сертификации работодателем. Предприятие должно "специализировать" контролера для проведения им конкретного вида деятельности по НК. Для подобной специализации могут потребоваться последующие производственные квалификационные мероприятия, если подтверждение сертифицирующей инстанции недостаточно для работодателя (специфические виды продукции, техника проверки, аппаратура, требования клиента). Тем самым для европейского стандарта EN 473 характерно тесное сотрудничество между сертифицирующей инстанцией и работодателем.

По евростандарту самой сертифицирующей инстанции в принципе нужно провести только завершающий процесс сертификации. Все остальные виды деятельности она может делегировать, т.е. поручать другим инстанциям. Прямо или косвенно многие сертификационные мероприятия могут, таким образом, проводиться работодателем. Но если даже работодатель в последующем оставляет в своих руках значительную долю видов деятельности по сертификации, сертифици-

* Предприятие (работодатель) – общество, частные или общественные организации, выплачивающие персоналу зарплату, пособие, содержание, гонорар или осуществляющие другие виды социальных услуг за проделанную работу.

рующая инстанция остается ответственной за все сертификационные мероприятия. Так, она должна убедиться в надлежащем выполнении делегированных предприятию видов деятельности, вести всю документацию по проходящим сертификацию лицам, выдавать сертификаты и разрешать деятельность этих инстанций (делегирование полномочий). Делегированные полномочия даются экзаменационным цен-

грам и уполномоченным по приему экзаменов (экзаменаторам).

2. Квалификационные требования к специалистам I и II уровней

Минимальные требования к продолжительности практической работы по конкретному виду НК и сроку обучения представлены в табл. 2.1 и 2.2.

2.1. Минимальные требования к продолжительности практической работы (в месяцах) по конкретному виду НК для специалистов I и II уровней

Вид контроля	Обозначение	Уровень I		Уровень II	
		Название стандарта			
		SNT-TC-1A	EN 473	SNT-TC-1A	EN 473
Вихретоковый	ET	1	3	9	9
Капиллярный	PT	1	1	2	3
Магнитопорошковый	MT	1	1	3	3
Радиационный	RT	3	3	9	9
Ультразвуковой	UT	3	3	9	9
Течеискание	LT	1	3	2	9

Примечание. Под продолжительностью практической работы понимается работа под руководством специалиста с более высоким уровнем квалификации.

2.2. Минимальные требования к специалистам I и II уровней к сроку обучения (в часах)

Вид контроля	I уровень		II уровень	
	SNT-NC-1A*	EN 473**	SNT-TC-1A*	EN 473**
ET	48	40	24	40
PT	12	16	16	24
MT	24	16	16	24
RT	88	40	80	80
UT	40	40	80	80
LT	40	40	24	80

* Программа обучения должна соответствовать требованиям работодателя.

** Программа обучения должна соответствовать требованиям независимого сертифицирующего органа.

Все международные сборники регламентирующих актов по квалификации персонала для НК разделяют квалификационные экзамены на три вида: общие, специальные и практические, включающие, как правило, один определенный вид НК, используемый в одном или нескольких промышленных секторах.

Общие и специальные экзамены сдаются в письменной форме. Практический экзамен должен выявить способность кандидата применить на практике свои навыки в выполнении конкретного вида НК.

Общий экзамен включает в себя вопросы, отобранные по случайному принципу из актуальных заданий, утвержденных аттестационным органом.

Специальный экзамен подразумевает вопросы на знание оборудования, действующих методик НК, с которыми может встретиться специалист при работе в данном промышленном секторе. Эти вопросы по случайному принципу выбирает сертифицирующий орган.

Минимальное число вопросов к кандидату на общем и специальном экзаменах указано в табл. 2.3.

Общий экзамен оценивается отдельно от специального, поэтому для сертификации в другом промышленном секторе кандидат не сдает заново общий экзамен. Отсюда следует, что оценки общего экзамена сохраняются для всех промышленных секторов.

2.3. Минимальное число вопросов на общем и специальном экзаменах

Вид контроля	I уровень		II уровень	
	SNT-NC-1A*	EN 473**	SNT-TC-1A*	EN 473**
<i>Общий экзамен</i>				
ET	40	40	40	40
PT	30	30	30	30
MT	30	30	30	30
RT	40	40	40	40
UT	40	40	40	40
LT	30	30	30	30
<i>Специальный экзамен</i>				
ET	20	20	20	20
PT	20	20	15	15
MT	20	20	15	15
RT	20	20	20	20
UT	20	20	20	20
LT	20	20	20	20

Общая оценка квалификационного экзамена рассчитывается по формуле

$$N = 0,25n_q + 0,25n_s + 0,25n_p;$$

где n_q – оценка общего экзамена; n_s – оценка специального экзамена; n_p – оценка практического экзамена.

Для получения сертификата кандидат должен получить на каждом экзамене по меньшей мере 70 % и общую оценку не менее 80 %.

3. Квалификационные требования к специалистам III уровня

В табл. 3.1 указаны минимальные требования, предъявляемые к срокам приобретения опыта кандидатами на III уровень квалификации в зависимости от их образования.

Все кандидаты на присвоение III уровня квалификации по тому или иному виду НК должны успешно (с оценкой не менее 70 %) сдать практический экзамен по II уровню этого вида контроля.

По нормам EN 473 каждый экзамен на III уровень содержит следующие части, выполняемые в письменной форме.

На базовом экзамене соискатель должен продемонстрировать:

- технические знания в области материаловедения и технологии, относящиеся к сфере деятельности кандидата;
- знания системы квалификации и сертификации;
- общие знания четырех методов контроля, требующиеся от специалиста II уровня и выбранные кандидатом в соответствии с табл. 2.1.

В эти четыре метода должны входить основной метод, по которому кандидат добивается сертификации, и три других, не менее одного из которых должен быть объемным (интроскопический UT или RT).

Базовый экзамен сдается первым, и его результаты действительны 5 лет, в течение которых должен быть сдан экзамен по основному методу.

Экзамен по основному методу состоит из трех частей:

- общего экзамена, охватывающего объем знаний III уровня, касающихся применяемого метода контроля;

3.1. Минимальные требования, предъявляемые к срокам приобретения опыта кандидатами на присвоение III уровня квалификации

Уровень квалификации	Уровень общего образования	Опыт работы (месяцы)
Кандидат, имеющий II уровень квалификации	Успешное окончание (присвоение степени) или, по меньшей мере, 3 года обучения в вузе.	12
	Окончание техникума, или по меньшей мере, 2 года обучения в вузе.	24
	Отсутствие указанного образования	48
Кандидат, не имеющий квалификации II уровня, для прямого допуска к III уровню должен сдать практический экзамен по указанному методу по II уровню	Окончание (присвоение степени) или по меньшей мере 3 года обучения в вузе.	24
	Окончание техникума или, по меньшей мере, 2 года обучения в вузе.	48
	Отсутствие указанного образования	72

– специального экзамена по методу НК в соответствующем производственном секторе, включая применяемые нормы, стандарты и технические условия;

– практического экзамена, заключающегося в разработке проекта или нескольких методик НК в соответствующем секторе.

Согласно нормам EN 473 и SNT-TC-1A по стандартам некоторых сертифицирующих органов экзамены по проверке основополагающих знаний состоят из части А, отражающей содержание норм по квалифика-

ции персонала в НК и включающей в себя вопросы по материаловедению, обработке материалов и дефектности продукции (табл. 3.2), и части В (табл. 3.3), в которую входят вопросы общего экзамена на II уровень по всем видам НК, перечисленным в табл. 2.1.

Все вопросы общего экзамена имеют выборочные ответы, и экзаменуемые должны отличить (отметить) правильный ответ.

Структура экзамена по основному методу представлена в табл. 3.4.

3.2. Структура базового экзамена по части А

Разделы экзамена	Минимальное число вопросов	Тематика
A1	15	Знание EN 473
A2	15	Знание SNT-TC-1A
A3	30	Знание материаловедения, производства и дефектности продукции
Всего	60	Время экзамена 3 ч

3.3. Структура базового экзамена по части В

Разделы экзамена	Минимальное число вопросов	Сборники вопросов II уровня по видам НК
B1	15	RT
B2	15	MT
B3	15	UT
B4	15	PT
B5	15	ET
B6	15	LT
Всего	90	Время экзамена 4 ч

3.4. Структура общего (C1), специального (C2) и практического (C3) экзаменов на III уровень квалификации по какому-либо виду НК

Разделы экзамена	Минимальное число вопросов	Тематика
C1.1	30	Основы и принципы данного вида НК
C1.2	15	Типичное использование этого вида НК

Продолжение табл. 3.4

Разделы экзамена	Минимальное число вопросов	Тематика
C2.1	10	Интерпретация в данном секторе промышленности американских норм
C2.2	10	Интерпретация в данном секторе промышленности европейских норм
Всего	65	Время экзамена 3 ч
C3	Один пример	Разработка правил контроля (спецификации)
		Время экзамена 4 ч

Для сдачи практического экзамена необходимо разработать правила контроля (ПК), или спецификацию, включающие письменное описание всех основных параметров и операций, которые выполняются при использовании техники НК для контроля объектов, относящихся к данному промышленному сектору согласно установленным нормативам и стандартам.

Оценка по проверке основополагающих знаний основного метода проводится отдельно. Общая оценка по проверке основополагающих знаний рассчитывается по формуле

$$N_B = 0,5n_A + 0,5n_B,$$

где n_A – оценка за часть А; n_B – оценка за часть В.

Для успешной сдачи этих экзаменов кандидат должен получить по меньшей мере 70 % за любую часть и общую оценку N_B не менее 80 %.

Общая оценка по проверке знаний основного вида НК рассчитывается по формуле

$$N_E = (N_{C1} + N_{C2} + N_{C3}) / 3,$$

где N_{C1} , N_{C2} , N_{C3} – оценки соответственно за части С1, С2 и С3.

Для успешной сдачи этого экзамена кандидат должен получить по меньшей

мере 70 % за каждую часть и общую оценку не меньше 80 %.

Для получения сертификата кандидат должен успешно сдать оба экзамена: по проверке основополагающих знаний и знаний основного вида НК.

Если не были получены необходимые положительные результаты по отдельным частям экзамена или если в целом не был получен общий положительный результат, то в соответствии с решением экзаменатора экзамен можно сдать повторно полностью или частично с учетом требований EN 473. Второй раз экзамен может быть сдан не менее чем через 30 дней. Если на повторном экзамене кандидату не удалось достичь требуемого результата или с его стороны последовало какое-либо нарушение порядка проведения экзамена, устанавливается срок ожидания 12 месяцев и полная передача всего экзамена.

4. Преимущества новой европейской системы сертификации

EN 473 дополнен целым рядом усовершенствований для пользователей системы, т.е. предприятий промышленности и лиц, которые должны пройти сертификацию. Их неполный перечень содержит следующие положения.

1. Для экзамена на I и II уровни установлены так называемые факторы важности, благодаря которым практическая часть экзамена приобретает большой вес в общем результате. Практическая часть в соответствии с этим входит в общий результат с долей в 50 %, т.е. имеет такое же значение, как и письменные части экзамена. Это дает значительное преимущество дефектоскопистам-практикам.

2. Если не выдержан квалификационный экзамен, то при известных обстоятельствах нет необходимости в его полной передаче. При определенных условиях повторно можно сдать экзамен по той части, где не был достигнут положительный результат.

3. Для специалистов I и II уровней необязательно обновлять сертификат каждые три года, так как для специалистов всех уровней действителен 5-летний срок действия сертификата, по истечении которого следует переаттестация (табл. 4.1).

4. При повторной полной сертификации через 10 лет после аттестации (табл. 4.2) необходима новая сдача экзамена, который может быть значительно сокращен по объему. Так, для специалистов I и II уровней достаточна сдача практического экзамена.

5. Сертификат в значительной степени защищен от подделки, так как он изготавливается в виде удостоверения с фотографией.

4.1. Сроки действия сертификатов (лет)

Стандарт	Уровень I или II	Уровень III
SNT-TC-1A	3	5
EN 473	5	5

4.2. Нормы обновления сертификатов

Стандарт	I период*	II период*
SNT-TC-1A	Е или Р**	Е или Р**
EN 473	Е	Р

* Под периодом подразумевается интервал времени в 3 или 5 лет.

** Символом Е обозначена переаттестация специалиста, т.е. обновление сертификата на основании только подтверждения деятельности в данном виде НК.

Символ Р означает повторную аттестацию, т.е. обновление сертификата на основании нового экзамена.

6. Сфера действия сертификата распространяется не только на вид ПК и уровень квалификации, но и на сектор промышленности. При смене рабочего места в пределах сектора промышленности сертификат сохраняет свое действие. Если новое рабочее место относится к сектору промышленности вне сферы действия сертификата, требуется сдать только специальный и практический экзамены.

При введении EN 473 устанавливается переходный период в 5 лет, в котором действуют следующие правила.

1. Если до выхода стандарта персонал был уже сертифицирован независимой организацией, то эта сертификация действительна до истечения своего срока, но не более 5 лет. Затем может последовать обновление (Е или Р).

2. Если до выхода EN 473 персонал был сертифицирован на производстве, то производственная система сертификации должна быть подвергнута аудиту со стороны сертифицирующей инстанции. Если отчет по аудиту положителен, то может последовать переаттестация по истечении срока действия существующего сертификата на основе квалификационного экзамена.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ ЗНАНИЯМ ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (Минимальные требования)

**Магнитный контроль (МК).
Программа подготовки (содержание и разделы)**

**Документ подготовлен Российским обществом
по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД)**

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ (МК)

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
-----------	---	---

**1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Электрический ток. Величины, характеризующие электрический ток		
Магнетизм. Основные понятия. Магнитные величины		
Магнитные поля рассеяния дефектов		

2. ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Общие сведения о преобразователях магнитных полей	Индукционные преобразователи магнитных полей	Полевые магнитотранзисторы
Гальваномагнитные преобразователи, основанные на эффекте Холла и эффекте Гаусса	Пассивные преобразователи магнитных полей	z-элементы
	Магнитоиндукционные преобразователи магнитных полей	Тонкопленочные магниторезисторы
	Гальваномагниторекомбинационные преобразователи	Феррозондовые преобразователи магнитных полей
	Полупроводниковые преобразователи на основе магнитодиодного эффекта	Однообмоточные феррозонды
	Магнитодиоды	
	Магнитотранзисторы	

3. МАГНИТНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

Толщиномеры пондеромоторного действия. Магнито-статические толщиномеры		
--	--	--

Продолжение прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
-----------	---	---

4. ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Определение	Аналитические расчеты. Матричные преобразователи	Феррозондовые приборы
Двухэлементный феррозонд	Техника феррозондовой дефектоскопии	
	Контроль цилиндрических объектов	
	Контроль плоских объектов	

5. МАГНИТОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИЯ

Определение	Запись в приложенном поле	
Запись на ленту	Магнитные ленты	
Индукционные дефектоскопы		

6. МАГНИТНЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПРОВОДОВ

Внутритрубные магнитные дефектоскопы-снаряды	Объемно-шовный дефектоскоп для магнитного контроля качества нефтегазопроводных электросварных труб в технологическом потоке	Сокращение объема обрабатываемой информации
	Неразрушающий контроль качества сварных швов нефтегазопроводных электросварных труб	
	Магнитные дефектоскопы для контроля стенок трубопроводов и резервуаров	

7. ДЕФЕКТΟΣКОПИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

	Поперечная тангенциальная составляющая магнитного поля	Намагничивающая система
	Двухчастотный метод дефектоскопии поверхностей сложной формы	Фазочувствительный электромагнитный метод дефектоскопии

Продолжение прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
-----------	---	---

**8. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Основные магнитные характеристики вещества и тела	Определение	Исследование связи параметров
Кривая намагничивания	Магнитные текстурометры	Зависимость параметров магнитно-акустических шумов от уровня микронапряжений
Петля магнитного гистерезиса	Методы и приборы контроля механических напряжений	Исследование влияния поверхностного пластического деформирования на параметры магнитных шумов
Первичные электромагнитные преобразователи	Эксперимент и оборудование	Сравнительный анализ параметров магнитных и акустических шумов и разработка алгоритмов контроля на основе их совместного использования анизотропии
Причины магнитного гистерезиса	Преобразователи с П-образным магнитопроводом	Вихревые преобразователи магнитной индукции
	Преобразователи с С-образным магнитопроводом	Динамически вращающиеся преобразователи
	Преобразователи с Т-образным, стержневым и сложным магнитопроводами	Влияние включений и концентрационных неоднородностей на процессы перемагничивания

**9. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Отжиг сталей	Влияние структурно-фазовых изменений при закалке на магнитные, электрические и механические свойства сталей	
--------------	---	--

Продолжение прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
	Закалка сталей Дозвтектоидные углеродистые стали Низколегированные конструкционные стали	
	Конструкционные легированные стали	
	Рессорно-пружинные стали	
	Особенности изменения намагниченности насыщения при закалке стали в интервале температур $A_{c1}-A_{c3}$	
	Заэвтектоидные углеродистые и легированные стали	
	Высоколегированные стали	
	Мартенситно-стареющие и аустенитно-мартенситные стали специального назначения	
	Магнитный структурный анализ закаленных изделий	
	Отпуск сталей	
	Структурно-фазовые изменения при отпуске закаленных сталей	
	Низкоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода до 0,3 %	
	Среднеуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,3 ... 0,4 %	
	Средне-, высокоуглеродистые и легированные стали с содержанием углерода более 0,4 %	

Продолжение прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
	Высоколегированные стали	
	Мартенситно-старяющие, аустенитно-мартенситные и ферритно-аустенитные стали специального назначения	
	Магнитный структурный анализ закаленных и отпущенных изделий	

10. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

	Анализ устойчивости магнитных состояний ферромагнетиков	Магнитно-акустоэмиссионные и электромагнитно-акустические методы контроля качества термической обработки сталей
	Структуроскопия сталей на основе анализа устойчивости их магнитных состояний к действию постоянных и переменных магнитных полей	Электромагнитно-акустические методы оценки структурного и напряженного состояния термически обработанных изделий
	Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий с различной структурой к действию упругих напряжений	Методы электромагнитной структуроскопии
	Устойчивость магнитных состояний стальных ферромагнитных изделий к воздействию температуры	

11. ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Коэрцитиметрические приборы	Приборы для контроля качества термической обработки по измерению остаточной индукции частично размагниченного состояния	
-----------------------------	---	--

Продолжение прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
Приборы неразрушающего контроля по измерению остаточной индукции		

12. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Структура и физико-механические свойства слюев, упрочненных различными способами		
Магнитные методы и приборы контроля качества поверхностного упрочнения изделий		
Приборы контроля качества поверхностного упрочнения изделий		

13. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА

Магнитные характеристики, используемые в фазовом магнитном анализе	Методы фазового магнитного анализа	Методы и приборы определения количества остаточного аустенита в ферромагнитных изделиях
	Качественный и количественный фазовый анализ стали	Методы и приборы контроля структуры и пористости изделий порошковой металлургии

14. МЕТОД ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Физические основы метода эффекта Баркгаузена, проблемы и перспективы его использования для контроля механических напряжений	Модели формирования магнитных шумов и определение основных параметров средств контроля	Первичные преобразователи магнитно-акустических шумов и исследование режимов их работы
	Базовая модель приборов серии АФС	

Окончание прилож. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к программам уровней I и II)
-----------	---	---

15. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ

	Кристаллографическая текстура и ее влияние на свойства материала	Устройство для магнитного метода определения текстуры
	Текстура и анизотропия свойств	Анизометры для измерения нормальной составляющей вектора намагниченности
	Методы определения текстуры	Магнитные текстурометры
	Основные методы определения текстуры	
	Магнитный текстурный анализ	
	Метод Акулова–Брюхатова	
	Метод дисперсии	
	Определение текстуры по кривым крутящего момента	

16. СТАНДАРТЫ. ИНСТРУКЦИИ ПО КОНТРОЛЮ. ПРОЦЕДУРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Работа с применяемыми стандартами или инструкциями под наблюдением другого специалиста	Составление инструкций по контролю в соответствии с требованиями стандартов, применяемых к фактическим рабочим условиям. Описание действий, выполняемых при проведении контроля	Составление процедур магнитного контроля. Применяемые технические регламентирующие документы. Описание параметров, учитываемых при магнитном контроле
--	---	---

17. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. КВАЛИФИКАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ

	Безопасность и защита окружающей среды	Обучение, аттестация
--	--	----------------------

Книга 2

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга является продолжением книги 1 т. 1 ("Визуальный и измерительный контроль") настоящего справочника, которая была посвящена вопросам визуального осмотра и контроля состояния объекта и измерения его параметров непосредственно контролером с помощью простых измерительных средств. Поэтому в представленной книге авторы постарались дополнить опубликованный в т. 1 материал обзором методов и средств контроля промышленных объектов с помощью достаточно сложных оптических систем. Во многих случаях этот контроль осуществляется без присутствия оператора.

Промышленные объекты работают во все более сложных условиях. При этом определение остаточного ресурса по результатам оптического контроля в условиях изношенности оборудования приобретает все большее значение, а относительный объем средств контроля, не требующих постоянного присутствия оператора, возрастает. Поэтому особое внимание в книге уделено автоматизированным средствам оптического контроля.

Оптический неразрушающий контроль применяется: в металлургии – для контроля геометрии проката (проволоки,

листов, труб, прутков, профилей), качества внутренней поверхности труб; в химической промышленности – для спектрального анализа, контроля структуры пластмасс и полимеров, колориметрического контроля растворов; в стекольном производстве – для контроля геометрии стеклянных листов и труб, обнаружения инородных включений, определения напряжений и фотометрических характеристик; в текстильной промышленности – для контроля цветности материала, диаметра нитей, структуры ткани, люминесцентного контроля наличия жировых пятен; в контроле окружающей среды – для определения степени запыленности и задымленности; в производстве цемента – для гранулометрического анализа исходных материалов; в строительстве – для контроля геометрии строительных конструкций, колориметрических измерений цвета плиток и других материалов; в горном деле – для контроля геометрии шахтных стволов, штреков, контроля абразивного износа тросов, определения степени запыленности и задымленности; в авиастроении – для контроля внутренних полостей двигателей; в электронной промышленности –

для контроля различных характеристик полупроводниковых материалов, контроля геометрии полупроводниковых структур; в радиопромышленности – для контроля качества печатных плат геометрии фотошаблонов и др.; в электровакуумной промышленности – для контроля напряжений в корпусах кинескопов, фотометрических характеристик люминофоров и источников света, геометрии элементов вакуумных приборов и т.д.; в производстве фотоматериалов – для контроля однородности фотоэмульсии и толщины основы, спектрометрии, сенситометрии, резольвометрии; в нефтехимической промышленности – для обнаружения мест утечки газа и нефти, анализа состава нефти; в пище-

вой промышленности – для люминесцентного контроля качества продуктов, спектрального анализа; в сельском хозяйстве – для автоматической сортировки семян и плодов по цвету, контроля качества молока, разделения клубней от комков земли, определения содержания белка в зерне, белизны муки, качества яиц и т.п.; в полиграфической промышленности – для контроля колориметрических характеристик репродукций, денситометрии; в лакокрасочной промышленности – для контроля цвета и блеска и т.д.

Книга предназначена для персонала, работающего со средствами оптического контроля, а также для студентов и инженеров, работающих в этой области.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ОНК)

1.1. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

ОНК основан на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК).

Оптическое излучение или свет – электромагнитное излучение с длиной волны $10^{-3} \dots 10^3$ мкм, в котором принято выделять ультрафиолетовую (УФ), видимую и инфракрасную (ИК) области спектра с длинами волн соответственно $10^{-3} \dots 0,38$; $0,38 \dots 0,78$ и $0,78 \dots 10^3$ мкм. Далее речь пойдет в основном о видимой части и в некоторой степени УФ-части спектра.

Возникновение ОИ связано с движением электрически заряженных частиц (электроны, атомы, ионы, молекулы). Дискретные спонтанные или индуцированные переходы носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии сопровождаются испусканием световых квантов (фотонов) с энергией, равной разности энергий этих уровней. Энергия фотона $E = h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; ν – частота излучения, Гц.

Скорость распространения ОИ в вакууме $c_0 = 299792,5$ км/с. В реальных средах ОИ распространяется со скоростью $v = c_0/n = \lambda_0\nu/n = \lambda\nu$, где $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ – показатель преломления среды; ϵ и μ – соответственно относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; λ_0 и λ – соответственно длина волны света в вакууме и среде.

Информационными параметрами ОИ являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты,

фазы, поляризации и степени когерентности. Для получения дефектоскопической информации используют изменение этих параметров при взаимодействии ОИ с ОК в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеяния, дисперсии света, а также изменения характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люминесценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений.

Основными информационными параметрами объектов оптического контроля являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны.

К числу дефектов, обнаруживаемых неразрушающими оптическими методами, относятся пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменения структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д.

С помощью оптических методов внутренние дефекты выявляются только в изделиях из материалов, прозрачных в оптической области спектра.

Основы оптической радиометрии. Основной характеристикой ОИ является *поток излучения* (мощность светового потока) $\Phi = dQ/dt$, где Q – энергия, Дж; t – время, с. Наиболее распространенная

единица измерения потока излучения – Ватт (Вт).

Поверхностной *плотностью излучения* M_e , или энергетической светимостью, называется отношение испускаемого поверхностью по одну сторону от себя, т.е. в полусфере, полного лучистого потока к площади этой поверхности

$$M_e = \frac{d\Phi}{dS_1}, \text{ Вт/м}^2.$$

Облученностью, или энергетической освещенностью E , называется отношение лучистого потока $d\Phi$, падающего нормально на какую-либо поверхность, к площади этой поверхности dS_2 , т.е.

$$E_e = \frac{d\Phi}{dS_2}, \text{ Вт/м}^2.$$

Силой излучения, или энергетической силой света, называется отношение лучистого потока $d\Phi$ к телесному углу $d\omega$, в пределах которого он распространяется, т.е.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}, \text{ Вт/ср.}$$

Это соотношение действительно для точечного источника излучения, т.е. тела, имеющего малые размеры по сравнению с расстояниями, на которых рассматривается его действие.

Энергетической яркостью излучающей поверхности в данном направлении называется отношение измеренной в этом направлении энергетической силы света к видимой площади излучающей поверхности, т.е.

$$L_{e\alpha_1} = \frac{dI_{e\alpha_1}}{dS_{1\alpha_1}},$$

где $dI_{e\alpha_1}$ – сила излучения в данном направлении α_1 ; $dS_{1\alpha_1}$ – видимая площадь элемента поверхности dS_1 в направлении, образующем угол α_1 с нормалью к элементу dS_1 .

Так как $dS_{1\alpha_1} = dS_1 \cos \alpha_1$, то

$$L_{e\alpha_1} = \frac{dI_{e\alpha_1}}{dS_1 \cos \alpha_1}.$$

Для источников излучения, имеющих яркость, одинаковую во всех направлениях, справедлив закон Ламберта, согласно которому сила света излучающей поверхности пропорциональна косинусу угла излучения. Для поверхностей, подчиняющихся этому закону,

$$dI_{e\alpha_1} = dI_{e0} \cos \alpha_1 = L_e dS_1 \cos \alpha_1.$$

Известно следствие из закона Ламберта, по которому устанавливается связь между энергетическими яркостью и светностью косинусного излучателя, а именно

$$M_e = \pi L_e.$$

Это же соотношение действительно и для диффузно отражающих или диффузно пропускающих тел. Если коэффициент диффузного отражения тела ρ известен, то энергетическая яркость такого тела при облученности на нем E равна

$$L_e = \rho \frac{E_e}{\pi}.$$

Качественными характеристиками вышеуказанных величин являются их спектральные характеристики, такие, например, как спектральная интенсивность плотности излучения r_λ , являющаяся величиной плотности излучения, приходящейся на интервал $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$, или спектральная плотность яркости b_λ . Связь между интегральными и спектральными характеристиками выражается как

$$M_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda \quad \text{или} \quad L_e = \int_0^\infty b_\lambda d\lambda \quad \text{и т.д.}$$

Существуют и другие энергетические параметры, которые используются при расчетах фотоэлектрических систем. *Энергия излучения* W описывается выра-

жением вида

$$W = \int_0^t \Phi(t) dt, \text{ Дж,}$$

где $\Phi(t)$ – функция изменения потока во времени.

Иногда для оценки эффективности лучистого потока вводят понятие о количестве облучения H_e :

$$H_e = \int_0^t E_e(t) dt, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Если оценивают мощность лучистой энергии по производимому ею световому ощущению, то переходят к световому потоку и соответствующим световым единицам.

Определения световых единиц аналогичны определениям соответствующих энергетических.

В видимой области спектра применяют систему световых единиц, соответствующую зрительному ощущению лучистых потоков с учетом спектральной чувствительности глаза. Единицей светового потока является люмен (1 лм = 1/683 Вт для $\lambda = 0,55$ мкм), сила света измеряется в канделах (кд), освещенность E – в люксах (лк), яркость – кд/м² (1 кд = лм/ср, 1 лк = 1 лм/м²).

Человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Если измерить лучистый поток в диапазоне длин волн $\lambda \dots (\lambda + \Delta\lambda)$ для какого-нибудь излучателя и световой поток, т.е. поток, воспринимаемый глазом в том же диапазоне спектра, то отношение светового потока dF_λ к лучистому потоку $d\Phi_\lambda$ называется коэффициентом видности

$$K_\lambda = \frac{dF_\lambda}{d\Phi_\lambda}.$$

Отношение коэффициента видности для какой-либо длины волны излучения λ к максимальному значению K_λ называется коэффициентом относительной видности

$$V_\lambda = \frac{k_\lambda}{k_{\lambda \max}}.$$

Величину $K_{\lambda \max}$ называют также световым эквивалентом лучистого потока. В качестве численного значения принято $K_{\lambda \max} = 683$ [лм/Вт].

Если лучистый поток определяется как

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda,$$

то, очевидно, световой поток

$$F = \int_0^\infty k_\lambda \Phi_\lambda d\lambda.$$

Тогда, с учетом, что $K_{\lambda \max} = 683$ лм/Вт, получим

$$F = 683 \int_{0,38}^{0,77} V_\lambda \Phi_\lambda d\lambda.$$

Пределы интегрирования определяются диапазоном значений V_λ . Нужно отметить, что в случае не только глаза, но и любого селективного приемника излучения, т.е. приемника, обладающего неодинаковой чувствительностью к излучению различных длин волн, оценка эффективности лучистого потока может быть проведена аналогично. Вместо спектральной кривой чувствительности глаза следует взять спектральную характеристику приемника.

Эффективность применения ОНК существенно зависит от правильности выбора геометрических, спектральных, светотехнических и временных характеристик, условий освещения и наблюдения ОК. Главное при этом – обеспечить максимальный контраст дефекта подбором углов освещения и наблюдения, спектра и интенсивности источника (непрерывного или стробоскопического), а также состояния поляризации и степени когерентности света. Необходимо учитывать различия оптических свойств дефекта и окружающей его области фона. Контраст опреде-

ляют по формуле

$$K = (L_0 - L_{\Phi}) / (L_0 + L_{\Phi}),$$

где L_0 и L_{Φ} – соответственно яркости объекта и фона.

Аналитический расчет контраста дефектов в зависимости от описанных выше факторов представляет сложную задачу, решение которой получено пока только для простейших случаев.

Физические основы взаимодействия излучения и вещества. Эффекты взаимодействия света и вещества с однородной изотропной средой могут быть описаны единым параметром – *комплексным показателем преломления* N (КПП) с учетом его зависимости от частоты, температуры, напряжений и других факторов:

$$N = n - ik,$$

где действительная часть n определяет скорость света в среде, а главный показатель поглощения k – затухание ОИ. Для немагнитных веществ (магнитная проницаемость $\mu = 1$)

$$n = \sqrt{\varepsilon},$$

где ε – диэлектрическая постоянная.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями:

$$n^2(1 - k^2) = \varepsilon \quad \text{и} \quad n^2 k = 2\pi\sigma / \omega,$$

где σ – удельная проводимость; ω – круговая частота излучения.

Вещества можно разделить на:

- однородные, отражение света (ОС) которых сводится к свойствам гладкой поверхности;
- однородные, для описания ОС которых используется модель плоского слоя (или системы слоев);
- вещества с шероховатой границей раздела сред в приповерхностной области;
- неоднородные вещества с объемной системой неоднородностей, описываемые моделью типа совокупности рассеивающих слоев.

По численным значениям КПП можно выделить:

- сильнопоглощающие вещества с $k > 10$ (металлы и т.п.) и высокой отражательной способностью, оптические свойства которых определяются характеристикой поверхности;
- слабопоглощающие вещества с $k \leq 0,01$ (вода, газы, некоторые стекла и т.п.) с низкой отражательной способностью, определяемой практически полностью величиной n ;
- вещества с $0,01 \leq k \leq 0,1$ (полупроводники), отражательная и излучательная способность которых существенно зависят от толщины слоя материала;
- вещества с $0,1 \leq k \leq 10$ (тонкослойные покрытия и т.п.), отражательная способность которых зависит и от толщины слоя, и от значения k .

Спектральные характеристики оптических свойств определяются совокупностью значений КПП для различных частот излучения. Как правило, спектр КПП находят экспериментально.

Взаимосвязь основных оптических констант вещества – показателя преломления и показателя поглощения – определяется интегральным уравнением Крамерса–Кронинга, позволяющим вычислить одну из констант на фиксированной частоте по известным для всего спектра значениям другой.

По спектральным свойствам материалы обычно разделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики. Металлы характеризуются высокой отражательной способностью, особенно в ИК-области спектра, наличием точки температурной инверсии, увеличением излучательной способности в УФ-диапазоне. Их оптические свойства определяются в основном проводимостью.

Для полупроводников характерно наличие поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, а также сильная зависимость оптических свойств от температуры.

Для диэлектриков характерно наличие зон прозрачности в широком диапазоне спектра с резкой границей поглощения.

Оптические свойства многокомпонентных рассеивающих сред (лаки, краски, окислы металлов и пр.) описывают с помощью различных моделей теории светорассеивающих (мутных) сред, например, с помощью двухпоточкового приближения. Оптические свойства веществ в монолите и в дисперсной среде могут резко различаться, например металлы хорошо отражают свет в монолитном состоянии, но в состоянии мелкодисперсной фазы обладают низкой отражательной способностью и используются в качестве поглощающих покрытий (платиновая чернь и т.д.). Диэлектрики в дисперсной фазе хорошо отражают свет в спектральных областях, соответствующих полосам поглощения монолитного материала.

Важнейшая особенность оптических свойств газов – селективность поглощения излучения. Форма и положение линий испускания (поглощения) газов сильно зависят от их концентрации и температуры.

При взаимодействии ОИ с веществом имеет место его поглощение, рассеяние, отражение и преломление.

Обозначим через $F_{0\lambda}$ падающий на вещество монохроматический поток ОИ; $F_{\alpha\lambda}$ – поглощенный средой поток; $F_{\rho\lambda}$ – отраженный поток; $F_{m\lambda}$ – рассеянный поток; $F_{\tau\lambda}$ – вышедший из среды поток.

На основании закона сохранения энергии

$$F_{0\lambda} = F_{\alpha\lambda} + F_{\rho\lambda} + F_{m\lambda} + F_{\tau\lambda} .$$

Величины $\alpha_\lambda = F_{\alpha\lambda} / F_{0\lambda}$; $\rho_\lambda = F_{\rho\lambda} / F_{0\lambda}$; $m_\lambda = F_{m\lambda} / F_{0\lambda}$ и $\tau_\lambda = F_{\tau\lambda} / F_{0\lambda}$ называются соответственно спектральными коэффициентами поглощения, отражения, рассеяния и пропускания. Они показывают, какую долю от падающего потока составляют поглощенный, отраженный, рассеянный и прошедший через среду лучистые потоки.

При взаимодействии вещества с полихроматическими лучистыми потоками вводят понятие интегральных коэффициентов поглощения, рассеяния, отражения и пропускания:

$$\alpha = F_\alpha / F_0 = \int F_{0\lambda} \alpha_\lambda d\lambda / \int F_{0\lambda} d\lambda ;$$

$$\rho = F_\rho / F_0 = \int F_{0\lambda} \rho_\lambda d\lambda / \int F_{0\lambda} d\lambda ;$$

$$m = F_m / F_0 = \int F_{0\lambda} m_\lambda d\lambda / \int F_{0\lambda} d\lambda ;$$

$$\tau = F_\tau / F_0 = \int F_{0\lambda} \tau_\lambda d\lambda / \int F_{0\lambda} d\lambda .$$

Отражением света (ОС) называется эффект возвращения световой волны при ее падении на границу раздела двух сред обратно в первую среду.

Различают зеркальное, диффузное и смешанное ОС. *Зеркальное* ОС имеет место, если неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны света. При этом свет отражается по законам геометрической оптики, т.е. угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения света.

Диффузное ОС сопровождается равномерным распределением отраженного света в пределах полусферы. Оно характерно для поверхности с неровностями порядка длины волны света, расположенными беспорядочно.

Смешанное ОС наблюдается при отражении от поверхностей с неровностями, большими длины волны света. Для него характерно преимущественное отражение в направлении зеркального ОС в сочетании с менее интенсивной диффузионной компонентой. Регулярные неоднородности поверхности приводят к появлению пространственного распределения отраженного света, характерного для явления дифракции.

ОС обычно носит селективный характер, что и определяет цветность различных тел.

ОС от гладкой поверхности диэлектрика в сильной степени зависит от поляризации падающего света и угла падения. При падении неполяризованного света на гладкую поверхность под углом Брюстера

$$i_B = \arctg(l/n),$$

где n – показатель преломления среды, отраженное излучение становится полностью поляризованным в плоскости, параллельной плоскости падения. При падении света на гладкую поверхность раздела двух сред из среды с большим показателем преломления наблюдается полное внутреннее отражение (ПВО) при углах больших

$$i_{\text{ПВО}} \geq \arcsin(n_2/n_1).$$

При этом коэффициент отражения от гладкой поверхности рассчитывают по формулам Френеля, связывающим его значение с углами падения, показателями преломления сред и состоянием поляризации падающего света. Коэффициент отражения от гладкой поверхности поглощающих сред (металлы, полупроводники) рассчитывают с использованием комплексного показателя преломления, учитывая поглощения в веществе.

Распределение отраженного света в пространстве, особенно при смешанном ОС, описывается с помощью индикатрисы коэффициента отражения. Иногда для характеристики рассеивателей используют понятие *коэффициента яркости* (β), т.е. отношение яркости (L) конкретного объекта в заданном направлении к яркости (L_0) идеального рассеивателя.

ОС, особенно при смешанном отражении, существенно зависит от геометрии освещения образца и регистрации рассеянного излучения, что необходимо оговаривать при измерениях наряду с другими факторами (спектр излучения источника, поляризация света, тип фотоприемника и пр.)

Поглощение света (ПС) – уменьшение энергии световой волны в веществе вследствие преобразования ее во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения (люминесценция), имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения.

Для твердых веществ характерно *собственное* поглощение, обусловленное взаимодействием света с кристаллической решеткой, и *характеристическое* (селективное) поглощение, возникающее вследствие колебаний и вращений молекул и приводящее к появлению полос резонансного поглощения.

Газы обладают в основном избирательным поглощением.

Ослабление монохроматического света в гомогенной изотропной среде за счет поглощения описывается законом Бугера

$$F_{\alpha\lambda} = F_{0\lambda} \alpha_{\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-\alpha_{\lambda} X),$$

где X – длина пути света в среде; $F_{0\lambda}$ – падающий поток; $F_{\alpha\lambda}$ – поток, поглощенный средой; α_{λ} – спектральный показатель поглощения среды, мм^{-1} ;

$$\alpha_{\lambda} = 4\pi k/\lambda,$$

где k – главный показатель поглощения среды.

Ослабление полихроматического излучения определяют интегрированием соответствующих потоков по длинам волн.

Рассеяние света (РС) – преобразование света веществом, сопровождающееся изменением направления его распространения, поляризации и (в общем случае) частоты.

РС обусловлено его дифракцией на оптических неоднородностях среды, зависит от их размеров, концентрации и комплексного показателя преломления.

Существует большое количество разновидностей эффекта РС. Рассеяние Рэлея происходит без изменения частоты света, наблюдается при прохождении света через скопление частиц с размерами, меньшими длины его волны.

Рассеяние света может происходить на электронах среды (явление Комптона), молекулах вещества (комбинационное рассеяние), флуктуации плотности среды (рассеяние Мандельштама–Бриллюена). Рассеяние Тиндаля характерно для мутных сред с размерами частиц порядка долей длины волны света, а рассеяние Ми – для сред с частицами, размеры которых составляют несколько длин волн света.

В мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейные эффекты – вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюена (ВРМБ) и др.

Для каждого вида рассеяния характерна своя индикатриса рассеяния. Например, при рассеянии Рэлея, Тиндаля индикатриса имеет симметричный характер, а при рассеянии Ми – резко выраженную асимметрию. Для слабо мутных сред (вода, чистый воздух, стекло) характерно малоугловое рассеяние, т.е. яркость пучка в направлении падающего на среду света значительно больше его яркости в иных направлениях.

Для сильно рассеивающих сред (молочное стекло и т.п.) характерно изотропное рассеяние.

В первом приближении ослабление ОИ за счет рассеяния может быть описано зависимостью, аналогичной закону Бугера

$$F_{m\lambda} = F_{0\lambda} m_{\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-r_{\lambda} X),$$

где r_{λ} – коэффициент ослабления излучения за счет рассеяния.

Рассеяние во многих случаях носит селективный характер, поэтому при измерениях оговаривают геометрию опыта, тип источника излучения, спектральный диапазон фотоприемника и др.

Например, непрозрачные в видимом свете (сильно рассеивающие) слои некоторых красителей становятся оптически прозрачными в ИК-диапазоне спектра, что используется в ИК-интроскопии.

Суммарное ослабление света веществом за счет рассеяния и поглощения определяется коэффициентом экстинкции

$\gamma_{\lambda} = r_{\lambda} + \alpha_{\lambda}$, вводимым в формулу закона Бугера.

Пропускание света, как и отражение, бывает направленным, диффузионным и смешанным. При направленном пропускании, характерном для оптических стекол, структура пучка падающего света не изменяется. Коэффициент пропускания учитывает при этом как френелевские потери на границе среды, так и поглощение в ней. Иногда вводят понятие *коэффициента внутреннего пропускания* τ'_{λ} , характеризующего потери в среде без учета потерь на отражение. Для плоской прозрачной пластины между τ_{λ} и τ'_{λ} имеет место соотношение

$$\tau_{\lambda} = \tau'_{\lambda} (1 - \rho^2).$$

Спектр пропускания среды характеризуется соответствующей зависимостью $\tau(\lambda)$, представляемой таблицей или графически.

В соответствии с законом Бугера

$$\tau_{\lambda} = \exp(-\alpha_{\lambda} l),$$

где α_{λ} – показатель поглощения; l – длина оптического пути.

Для удобства расчетов используют оптическую плотность или $D = \lg(1/\tau)$, Б.

При этом $\tau = 10^{-D}$. Коэффициент пропускания двух пластин определяется $\tau_{1,2} = \tau_1 \tau_2 = 10^{-(D_1 + D_2)}$ и т.д.

Для распространенного случая изменения τ_{λ} слоя плоского прозрачного диэлектрика (стекло, полимер) с известным показателем преломления n при нормальном падении света на образец с учетом формул Френеля, получим

$$\tau_{\lambda} = \tau'_{\lambda} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^2.$$

При оценке пропускания рассеивающей среды следует учесть дополнительное ослабление света за счет его рассеяния. При этом выражение закона Бугера имеет вид:

$$\tau_{\lambda} = \exp[-(\alpha_{\lambda} + m_{\lambda})l],$$

где l – длина пути лучей в среде.

При измерениях пропускания прозрачных люминесцирующих сред в спектральном диапазоне, соответствующем области возбуждения люминесценции, необходимо тщательно отфильтровывать ее излучение, например, с помощью узкополосного светофильтра или дополнительного спектрофотометра.

Преломление света. При падении пучка лучей света на границу раздела однородных гладких прозрачных сред часть его отражается под углом α_1 , равным углу падения, другая же часть проходит во вторую среду под углом α_2 , определяемым законом преломления

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_{21}.$$

Константа n_{21} есть относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой и определяется отношением скоростей света в этих средах. Абсолютный показатель преломления n_a есть отношение скорости света в вакууме к его скорости в среде. Очевидно, что

$$n_{21} = n_{2a} / n_{1a}.$$

Чаще всего в технике определяют показатель преломления среды к воздуху

$$n_a = n_{a \text{ возд}} n_{21}.$$

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре $n_{a \text{ возд}} = 1,00027$. При условиях измерений, отличных от нормальных, вводят поправку для реальных значений температуры, давления и влажности воздуха.

Показатель преломления определяется природой вещества и зависит от внешних условий, особенно от температуры и длины волны света. Принято указывать индексами значения температуры и длины волны света, при которых измерен показатель преломления.

Различают изотропные и анизотропные материалы. У первых (стекла, жидкости, газы) показатель преломления не зависит от направления света при измерениях. Анизотропные материалы (кристаллы и др.) характеризуются двойным лучепреломлением, т.е. расщеплением луча на два, распространяющихся с разными скоростями. Скорость одного из них ("необыкновенного") зависит от направления. Анизотропия наблюдается и у изотропных в обычных условиях веществ при сжатии и других воздействиях.

Лучи, отраженные от поверхности раздела, тоже несут информацию о показателях преломления сред. Их соотношение влияет на амплитуду, фазу и поляризацию отраженного луча, причем эти параметры зависят также от поляризации и направления падающего луча.

Преломление и отражение света от сильнопоглощающих сред (полупроводники, металлы) описываются теми же соотношениями, что и для прозрачных, но с введением комплексного показателя преломления

$$\hat{n} = n - ik,$$

где k – главный показатель поглощения.

Показатель преломления зависит от плотности вещества. Функция показателя преломления $f(n)$ обычно прямо пропорциональна плотности:

$$f(n) = rd,$$

где r – постоянная, характерная для конкретного вещества, называемая *удельной рефракцией*; d – плотность.

Дисперсия – это зависимость показателя преломления от длины волны света. Обычно при увеличении частоты показатель преломления увеличивается (нормальная дисперсия), однако в окрестности полос поглощения среды наблюдается аномальная дисперсия. Дисперсию оценивают разностью показателей преломления каких-либо длин волн $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$.

Терморрадиационные характеристики вещества. Все нагретые тела излу-

чают в широком спектре ОИ. Для абсолютно черного тела (АЧТ) существует однозначная связь между его температурой и параметрами его излучения (спектр и мощность).

Реальные тела (при равных с АЧТ температурах) излучают меньшие мощности. Кроме того, спектральное распределение теплового излучения многих реальных объектов может существенно отличаться от спектра излучения АЧТ.

Для неселективных (серых) излучателей основной терморadiационной характеристикой (ТРХ) служит коэффициент теплового излучения ε , равный отношению излучательных способностей серого тела и АЧТ.

Отметим, что для серых тел сохраняется не только спектральное, но и угловое распределение излучения АЧТ, которое в свою очередь является диффузным или ламбертовским излучателем.

Для неселективных излучателей отличие спектра их излучения от АЧТ особенно сильно вне полос резонансного поглощения, в пределах которых имеет место "черное излучение".

Количественно тепловое излучение определяется энергетической светимостью M и спектральной плотностью энергетической светимости m_λ .

В соответствии с законами Стефана-Больцмана и Планка

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

и

$$m_\lambda = \varepsilon_\lambda c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1},$$

где c_1, c_2 – константы; T – температура.

Величины ε и ε_λ (интегральный и спектральный коэффициенты теплового излучения) являются важнейшими оптическими характеристиками тел. Их численные значения зависят от многих факторов (материал, шероховатость поверхности и т.д.) и меняются в пределах $0 \leq \varepsilon \leq 1$ и $0 \leq \varepsilon_\lambda \leq 1$.

Коэффициенты излучения измеряются обычно для двух режимов. В первом

случае оценивают излучение тел в пределах полусферического телесного угла 2π , во втором – измерения проводят в узком телесном угле, обычно в направлении нормали к поверхности (этот коэффициент излучения отмечают индексом ε^N).

1.2. ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Фотометрическая аппаратура весьма разнообразна. Для спектральных измерений применяют спектрофотометры различных конструкций, монохроматоры и другие спектральные приборы, а также наборы стеклянных, интерференционных или других фильтров, выделяющих нужную область спектра.

Поляриметрические измерения проводят с помощью фотометров, оснащенных пленочными или кристаллическими поляризаторами и анализаторами, компенсаторами и другими приспособлениями.

Измерения пространственного распределения оптических характеристик объектов (индикатрис) производят с помощью гониофотометров, снабженных многоэлементными матричными фотоприемниками или приспособлениями для проведения испытаний при различных углах падения света на образец и приема излучения; угловое разрешение лучших гониофотометров составляет $10''$.

Оптические характеристики в диффузном излучении определяют обычно с помощью шаровых фотометров, снабженных оптическими интеграторами типа сферы Ульбрихта.

Измерения оптических характеристик при импульсном освещении объекта реализуют с помощью фотометров, содержащих импульсные источники света и малоинерционные фотоприемники (ФЭУ, фотодиоды и др.).

Для измерений в мощном и сверхмощном лазерном излучении используют фотометры, содержащие устойчивые к такому воздействию оптические элементы и приемники излучения (охлаждаемые

зеркала, фокусаторы, линзы из оптических керамик, калориметрические приемники излучения и т.д.).

Измерение оптических характеристик в области сверхмалых мощностей (биолюминесценция, оптическая световая связь, интегральная оптика и пр.) производят с помощью высокочувствительных фотометров на базе ФЭУ, усилителей яркости света, чувствительных фотоматериалов и т.п.

Измерение интегральных (по длинам волн) оптических характеристик производят фотометрами с приемниками излучения, имеющими соответствующую спектральную характеристику.

Несмотря на разнообразие типов и схемотехнических решений фотометров, все они содержат источник и приемник излучения, оптические элементы различного назначения (линзы, призмы, зеркала, поляризаторы, аттенюаторы, световоды, светофильтры, светоделители, дифракционные решетки и т.п.), а также электронные схемы обработки сигналов.

Современные фотометры делятся на два типа: 1) прямого отсчета; 2) метода сравнения.

В первых используется световая характеристика приемника, т.е. зависимость сигнал-свет. Эти приборы обычно имеют один приемник; шкала в них градуирована непосредственно в световых единицах.

В фотометрах, работающих по методу сравнения, приемник используется в качестве индикатора, сравнивающего исследуемый поток с заданным (эталонным).

Фотометры сравнения (ФС) делятся на три группы:

- 1) с одновременным сравнением потоков с помощью двух фотодетекторов;
- 2) с последовательным сравнением потоков при одном фотодетекторе;
- 3) с компенсацией эталонного излучения (метод замещения).

Для высокоточных измерений применяют обычно двухлучевые фотометры, позволяющие устранять влияние нестабильности характеристик источников све-

та и приемника излучения на результаты испытаний. Наивысшей точностью обладают фотометры с оптической компенсацией, реализующие способ замещения. При этом выходной сигнал фотометра, в рабочем канале оптической схемы которого установлен образец, компенсируется до исходного (например, нулевого при балансных схемах измерения) значения введением в опорный канал оптического клина или компенсатора, для которого величина его компенсирующего перемещения (воздействия) однозначно связана с измеряемым параметром. Их погрешность составляет 0,1 ... 0,5 %.

Возможности конструктивно более простых одноканальных фотометров прямого измерения в видимой и ближней ИК-области спектра существенно расширились за счет разработки метода самокалибровки кремниевых фотодиодов. Сущность его заключается в точном определении абсолютной чувствительности фотодиодов специальной конструкции для волны излучения фиксированной длины. Погрешность измерения мощности в диапазоне 1 ... 10 мВт лазерного излучения при длине волны 0,63 мкм составляет 0,05 %.

Одной из определяющих тенденций развития фотометрической аппаратуры является переход к использованию многоканальных систем измерения, реализуемых либо с помощью систем бегущего луча (сканирующие лазерные микроскопы и подобные устройства), либо на основе матричных фотопреобразователей. Последние особенно перспективны в связи с жесткой геометрией светочувствительной структуры. Это ПЗС, фотодиодные (ФД) линейки и матрицы, электронно-оптические микроканальные умножители и подобные устройства.

Например, ФД-линейки, сопряженные оптически с усилителями яркости изображения на базе микроканальных усилителей, обеспечивают регистрацию оптических сигналов в области длин волн 0,2 ... 1,3 мкм при динамическом диапазо-

не до 100 дБ и минимальной мощности на входе порядка 10^{-6} Вт. Пространственное разрешение 1200 элементов и более по длине ФД-линейки при абсолютной величине одного элемента (пикселя) до 10×10 мкм (зазор между ними 2 ... 3 мкм). Точность растра ПЗС и ФД-линейек порядка 0,01 % при высокой его стабильности во времени. Временное разрешение подобных систем до 10^{-6} с.

Высокая метрологическая надежность матричных фотопреобразователей в достаточно широком диапазоне внешних условий, а также простота их соединения с ПЭВМ за счет дискретного характера сигнала определяют перспективность их применения в фотометрической аппаратуре самого различного назначения.

Возможности фотометра любого типа существенно расширяются при сочетании их с волоконно-оптическими системами сбора информации. Использование световодов длиной до 100 м и более позволяет проводить измерение объектов сложной формы, внутри различных полостей, в условиях сильных электромагнитных помех, при радиационном воздействии, в газовой или жидкой средах. Световоды из кварца используют для измерений в УФ-, ВИ- и ближней ИК-областях спектра (0,2 ... 2,0 мкм), из специальных халькогенидных стекол и кристаллов – для работы в дальнем ИК-диапазоне (2 ... 20 мкм и более). Диаметры световодов – от 0,5 мм для одножильных до 10 мм и более для многожильных (в том числе регулярных, передающих изображение). Число каналов в оптических диссекторах (ответвителях) достигает 50 ... 100 и более. Световоды имеют стабильные оптические характеристики (при отсутствии изгибов, ударов и других воздействий, а также мощных потоков рентгеновского излучения, вызывающего потемнение стекол).

В качестве источников света в современной фотометрической аппаратуре применяются как традиционные излучатели

(светоизмерительные лампы накаливания, в том числе галогенные, со стандартными спектрами излучения – источники типа "А", "С", "Д" и т.д.), так и новые источники света – импульсные ксеноновые лампы, светодиоды, лазеры различных типов. Применение лазеров позволяет реализовать принципиально новые методы когерентной фотометрии с повышенной точностью.

Контроль энергии или мощности лазеров производят стандартными тепловыми или фотоэлектрическими измерителями. Особенно широко применяют тепловые измерители на основе болометров, пирозлектриков, термоэлементов. Для измерения мощного ($P \geq 1$ Вт) излучения, особенно длинноволнового, с помощью этих приемников измеряют температуру твердого или жидкого поглотителя в калориметрической ячейке. При этом на измеритель направляется часть пучка лазера, отводимая с помощью полупрозрачной пластины, дифракционной решетки, зеркального obtюратора и т.п. Встречаются датчики проходного типа, выполненные в виде герметичной ячейки с поглощающим излучение газом, располагаемой в пучке лазера. Поглощая излучение, газ нагревается и изменяется давление в ячейке, измеряемое пьезоэлементом или другими датчиками давления.

В ряде случаев необходимо контролировать распределение интенсивности по сечению пучка, в том числе в реальном времени. Для этого применяют специальные сканирующие измерители мощности с приемной апертурой в виде точечной диафрагмы или узкой щели (или полосы), перемещаемой по сечению пучка.

Распределение мощности по сечению для потоков $P \leq 0,1$ Вт можно оценивать с помощью пирозлектрических телевизионных камер, фотодиодных матричных преобразователей, тепловизоров. Этот метод применяют с использованием ответвителей пучка с дополнительными ослабляю-

шими устройствами (поглощающие фильтры). Применяют также мишени из металла для визуализации поля излучения импульсных лазеров косвенным методом по температурному полю мишени.

1.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.3.1. Измерение коэффициента отражения

Коэффициент отражения (КО) определяется как отношение отраженной части светового потока к падающей.

По условиям падения (отражения) различают полусферическое, коническое, направленное направления потока.

Согласно принципу обратимости Гельмгольца, при определении направленного КО получается одно и то же значение, если источник и приемник излучения поменять местами.

Обычно, особенно в ИК-области спектра, измеряют монохроматический или квазимонохроматический КО в связи со сложностью реализации широкополосных (неселективных) источников и приемников излучения.

Так же разработаны методики измерения интегральных КО для полихроматических источников, в связи с большим значением этого параметра для теплообмена объекта со средой.

Для имитации источников заданного спектрального состава применяют сложные оптические установки с ксеноновыми лампами, угольной дугой, трубчатыми кварцевыми лампами и другими современными источниками света. Эти установки позволяют, в частности, измерять КО в условиях, имитирующих космические.

Схемы измерения КО существенно различны для зеркальных и диффузных объектов.

В абсолютном методе измерения коэффициента зеркального отражения (КЗО) на приемник излучения направляют лучи-

стый поток, обычно параллельный, и регистрируют соответствующий сигнал a_1 . Затем в пучок света вводят образец, а приемник перемещают в плоскости падения луча и нормали к зеркалу до положения, при котором на него полностью попадает отраженный от зеркала поток и снова фиксируют сигнал приемника a_2 .

Отношение сигналов равно КЗО

$$\rho_{\text{зер}} = a_1/a_2.$$

Измерения выполняют при различных углах падения. В случае необходимости меняют и другие параметры эксперимента – спектральный состав излучения, диаметр пучка света, степень поляризации и т.п. Данный метод требует прецизионного устройства углового перемещения приемника (или излучателя) и тщательной юстировки установки в целом.

Влияние рассеянного света в помещении устраняют модуляцией излучателя. Для компенсации нестабильностей излучателя и приемника часть излучения направляют с помощью оптического коммутатора непосредственно на приемник, реализуя двухканальную схему измерения.

Абсолютное измерение КЗО возможно также методом Тэйлора с помощью интегрирующей сферы.

Измерение КЗО особенно сложно для высокоотражающих зеркал лазеров и других подобных систем, так как сигналы приемника при его освещении непосредственно от излучателя и отраженным пучком от образца очень близки.

В силовой лазерной оптике коэффициент отражения мощного излучения иногда определяют как

$$\rho_{\text{зер}} = 1 - \alpha,$$

где α – коэффициент поглощения, определяемый косвенно по нагреву зеркала.

При массовых измерениях, поверке рефлектометров удобнее применять относительный метод измерения, основанный на сравнении сигналов, получаемых в одинаковых условиях эксперимента при

отражении света от образца и эталона с известным КЗО.

Иногда требуется оценить КЗО при диффузном освещении образца. Подобные задачи возникают, например, в гелиотехнике. В этом случае образец освещают с помощью молочного стекла, равномерно освещенного снаружи множеством ламп, или используют полую диффузно окрашенную изнутри сферу, свет в которую вводят через закрепленный в ее стенке рассеиватель. Отраженный образцом поток измеряют через одно из отверстий сферы. КЗО вычисляют, например, используя принцип обратимости Гельмгольца.

Измерение КЗО поверхностей произвольной формы проводят, используя не параллельные, а сходящиеся пучки света, сфокусированные на образец линзой на площадку возможно меньшего размера, в пределах которой ее можно считать плоской. Отраженный пучок, сохраняя структуру падающего пучка, с помощью дополнительной линзы направляется на фотоприемник. Иногда применяют автоколлимационный вариант метода со светоделителем. Возможны как абсолютные, так и относительные измерения.

С помощью микрофотометрических устройств измерения КЗО можно проводить с высоким пространственным разрешением (вплоть до 0,01 мм и менее), что необходимо при исследовании подложек микросхем, распределения КЗО по торцу световодов и т.п.

Схемы измерения диффузного отражения. Измерение лучистого потока, отражаемого диффузной поверхностью, не представляет особой трудности – достаточно измерить яркость отраженного излучения в одном направлении и проинтегрировать ее на основании закона Ламберта по полусфере.

Особенно удобно измерение коэффициента диффузного отражения (КДО) при помощи вспомогательного идеального диффузного рассеивателя.

На поверхность контролируемого объекта направляют излучение источника и определяют яркость поверхности L_λ . Затем заменяют образец эталоном и измеряют его яркость L_{λ_3} . Зная ρ_{λ_3} эталона, находят ρ_λ объекта по формуле

$$\rho_\lambda = \rho_{\lambda_3} \frac{L_\lambda}{L_{\lambda_3}}.$$

В качестве эталона обычно применяют свежий оксид магния или матированное молочное стекло типа МС-13.

Однако данная методика не пригодна для объектов со смешанным (зеркально-диффузным) характером отражения. При этом отраженное излучение неоднородно распределено по полусфере и для определения отраженного потока недостаточно измерения в одном направлении. Угловую плотность (или яркость) отраженного излучения следует измерять в каждой точке полусферы либо собрать излучение из полусферы на приемник. Излучение обычно направляется по нормали к образцу. Индикатриса отраженного излучения имеет, как правило, осесимметричный характер, поэтому измерение достаточно провести в одной плоскости, содержащей нормаль к образцу. Метод этот, однако, пригоден только для контроля КДО объектов, близких к диффузным, так как при значительной зеркальной составляющей появляется ошибка из-за невозможности измерить КДО при направлениях, близких к нормали. При падении излучения на объект под углом, отличным от нормального, индикатриса становится неосесимметричной и приходится измерять КДО для всех точек полусферы.

От указанных недостатков свободна установка, показанная на рис. 1.1.

Осесимметричная пространственная индикатриса отражения создается за счет освещения образца полым конусом света. Это не изменяет значения КДО по сравнению с обычным способом освещения при заданных углах $\Delta\alpha$ и $\Delta\varphi$, так как эффект темнопольного освещения сводится к уве-

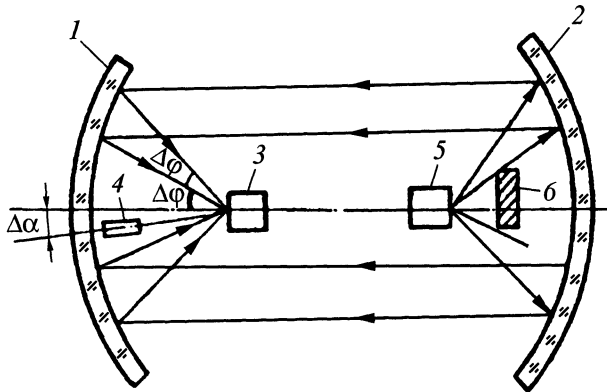


Рис. 1.1. Схема рефрактометра с темнопольным осветителем:

1, 2 – сферические зеркала; 3 – образец; 4 – фотодетектор; 5 – источник света; 6 – экран

личению количества аналогично расположенных относительно поверхности освещенных пучков, т.е. эквивалентно увеличению интенсивности падающего пучка (при изотропности отражательных свойств объекта). Для измерения падающего потока вместо образца ставят приемник излучения.

Вместо собирания излучения из полусферы при падении луча на образец для измерения КДО объектов со смешанным характером отражения можно использовать полусферическое освещение (например, с помощью шара Ульбрихта) и измерение отражения в заданном направлении (рис. 1.2)

Внутренняя поверхность сферы покрыта диффузно отражающей краской. Возможность измерения направленной КДО в данном случае следует из принципа Гельмгольца. Для этого достаточно измерить яркость образца и стенки сферы и вычислить их отношение. Проблемой в этом методе является равномерность окраски сферы.

Для измерения КДО при высоких температурах эффективен метод относительной рефлектометрии. Он основан на измерении отношения двунаправленных КДО при двух длинах волн λ_1 и λ_2 . Метод,

однако, пригоден только для веществ, у которых индикатрисы одинаковы для λ_1 и λ_2 , что редко имеет место.

Для собирания отраженного от объекта излучения часто применяют зеркальные полусферы (рис. 1.3). Объект и приемник установлены вблизи центра полусферы в оптически сопряженных точках. Для измерения падающего потока приемник ставят на место образца. КДО определяется по формуле

$$\rho_\lambda = \rho_{\lambda c} \frac{c_{отр}}{c_{пад}}$$

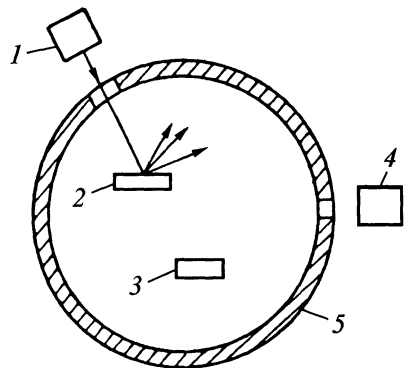


Рис. 1.2. Схема рефлектометра с интегрирующей сферой:

1 – источник света; 2 – экран; 3 – образец; 4 – фотоприемник; 5 – сфера

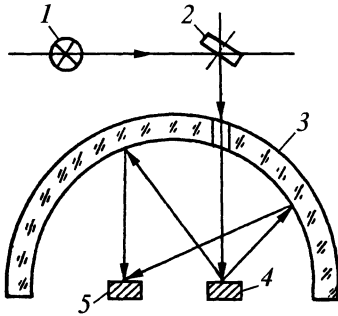


Рис. 1.3. Схема рефлектометра с зеркальной полусферой:

1 – источник света; 2 – зеркало; 3 – полусфера; 4 – образец; 5 – фотодетектор

где $\rho_{\text{лс}}$ – ОС сферы; $c_{\text{отр}}$ и $c_{\text{пад}}$ – показания индикатора при соответствующих положениях приемника.

Вместо сферы можно применить параболы, однако им свойственны такие недостатки, как уход части отраженного излучения через отверстие сферы, влияние aberrаций оптики и угловой чувствительности приемника.

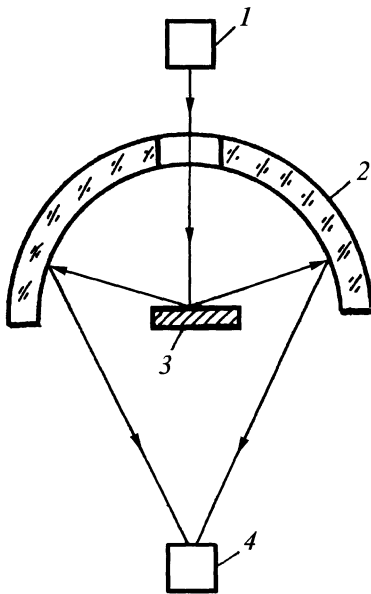


Рис. 1.4. Схема рефлектометра с эллипсоидным зеркалом:

1 – источник света; 2 – эллипсоид; 3 – образец; 4 – фотоприемник

Наиболее эффективны и свободны от этих недостатков схемы с эллипсоидными зеркалами (рис. 1.4). Здесь снижено влияние aberrации, отраженный поток падает на приемник под малым углом, образец и приемник существенно отдалены друг от друга, что облегчает, например, нагрев объекта, возможно определение потерь отраженной энергии через входное отверстие при смешанном отражении образца.

1.3.2. Измерение коэффициента поглощения (КП)

Экспериментально коэффициент поглощения (КП) обычно определяется путем измерения ослабления параллельного светового потока при прохождении однородной плоскопараллельной пластины. При этом необходимо учитывать коэффициент отражения от обеих поверхностей. Если известен показатель преломления пластины, коэффициенты отражения вычисляются по формуле Френеля. Если показатель преломления неизвестен, его отдельно измеряют, например, рефлектометром. Влияние отражения можно исключить, воспользовавшись пластинами из одного материала, но с различными толщинами l_1 и l_2 . В этом случае уравнение для вычисления α_λ имеет вид:

$$\alpha_\lambda = [1/(l_1 - l_2)] \lg(\Phi_{\lambda_2} / \Phi_{\lambda_1}),$$

где Φ_{λ_1} и Φ_{λ_2} – соответственно потоки после прохождения первой и второй пластин или пропорциональные им сигналы фотоприемника. Перед фотоприемником рекомендуется ставить оптический интегратор типа молочного стекла.

В случае одной пластины КП определяют по формуле

$$\alpha_\lambda = 1/l [2 \lg(1 - \rho_\lambda) - \lg \tau_\lambda],$$

где τ_λ и ρ_λ – соответственно коэффициенты пропускания и отражения образца.

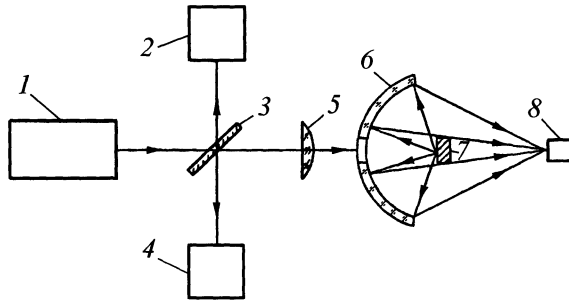


Рис. 1.5. Схема лазерного рефлектометра:
 1 - лазер; 2, 4, 8 - приемники; 3 - полупрозрачная пластина;
 5 - линза; 6 - зеркало; 7 - объект

Измерения в белом (полихроматическом) свете проводят, используя широкополосные излучатели и приемники со светофильтрами.

Интегральный КП может быть также подсчитан по результатам его спектрофотометрического определения по формуле

$$КП_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} = \int M_{\lambda} \alpha_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda / \int M_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda ,$$

где M_{λ} и S_{λ} - соответственно спектральные плотности излучения света и чувствительности фотоприемника. Пределы интегрирования выбираются исходя из задачи.

Схема рефлектометрического метода измерения КП показана на рис. 1.5. Излучение непрерывного или импульсного лазера 1 линзой 5 фокусируется на объект 7. Диффузно отраженное излучение сферическим зеркалом 6 фокусируется на приемник излучения 8. Зеркально отраженное излучение полупрозрачной пластиной 3 направляется на приемник 4. Пластина 3 направляет также часть излучения лазера на контрольный приемник 2. КП определяется по формуле

$$\alpha = 1 - \rho ,$$

где $\rho = \rho_d + \rho_z$, ρ_d и ρ_z - соответственно коэффициенты диффузного и зеркального отражения, определяемые по сигналам приемников 2, 4 и 8. Калибровку прибора

производят по стандартным фотометрическим эталонам.

1.3.3. Измерение коэффициента рассеяния

Измерения коэффициента рассеяния света (КР) для слабо рассеивающих веществ (оптические стекла, некоторые полимеры) проводят аналогично измерению коэффициента пропускания света (КП). Образец в виде плоской пластины с полированными гранями устанавливают нормально параллельному пучку света, диаметр которого должен быть менее габарита образца. Предварительно измеряют сигнал, пропорциональный интенсивности прямо прошедшего света y_0 .

Затем фотоприемную часть прибора, состоящую из объектива и жестко скрепленного с ним приемника лучистой энергии, поворачивают вокруг оси, проходящей через середину образца, на угол, при котором "прямой" поток излучения не попадает на приемник. В этом случае сигнал прибора y пропорционален только рассеянному световому потоку.

КР вычисляют по формуле

$$\rho_{\lambda} = y / y_0 .$$

Сложность измерений заключается в том, что интенсивность рассеянного света в высокопрозрачных оптических материалах может быть значительно (в сотни и

более раз) меньше интенсивности "прямого" света. Поэтому в качестве источника света предпочтительны лазеры с высокой интенсивностью излучения. В этом случае абсолютная величина рассеянного потока позволяет достичь хорошего отношения сигнал/шум, особенно при модуляции излучения и его дополнительной спектральной фильтрации на входе фотоприемника с помощью интерференционного светофильтра.

Измерения проводят в области малых углов. Особенность подобных измерений состоит в необходимости применения точного гониометра, поскольку интенсивность рассеянного света возрастает по мере приближения к оси пучка. Обычно проводят измерения значений ρ_λ для ряда углов ψ и затем экстраполируют полученную зависимость $\rho_\lambda = \rho_\lambda(\psi)$ до значения $\rho_\lambda(0)$ при $\psi \rightarrow 0$.

Измерения КР имеют особое значение в новых областях техники – производстве материалов для волоконно-оптических линий связи и оптических элементов сверхмощных лазеров, где рассеяние света во многом определяет качество изделий.

Измерения КР для сильно рассеивающих материалов (бумага, матовые стекла, ряд полимеров, растворы и др.) производят с помощью гониофотометров. В лазерном гониофотометре (ЛГФ) образец (пластина из исследуемого материала, кювета с раствором и пр.) освещается лазером. Излучение, рассеянное в полусфере, анализируется с помощью световодов, расположенных под различными углами к образцу и направляющих свет на фотоприемники.

Возможна схема с механическим сканированием излучения с помощью единичного световода, перемещаемого по дуге окружности с центром в середине образца. В ряде случаев, для оценки КР образцов с неровной поверхностью (кристаллы и т.п.) они могут помещаться в иммерсионную жидкость для устранения бликов отраженного света.

Гониофотометры универсальны, но сложны и требуют тщательной юстировки.

В промышленности часто применяют фотометры с фиксированным углом приема излучения, обычно 45 или 90° к оси падающего пучка. Эти приборы, называемые *нефелометрами* (измерители мутности), применяют для концентрационного колориметрического анализа, так как КР в ряде случаев функционально связан с количественным содержанием химического элемента.

1.3.4. Измерение коэффициента пропускания

Для оптически прозрачных изотропных нерассеивающих сред (полированные стекла, кюветы с жидкостью и т.п.) применяют **метод измерения в параллельных пучках** при ортогональном падении лучей света на образец. С помощью фотометра (или спектрофотометра) интегральные (или спектральные) коэффициенты пропускания определяют как отношение интенсивностей прошедшего через объект и падающего на него излучения. Измерения проводят в естественном или поляризованном свете. Возможен относительный метод измерения (сравнение коэффициентов пропускания образца и эталона в равных условиях).

Для оптически активных, двулучепреломляющих сред при измерениях оговаривают направление плоскости поляризации лучей, падающих на объект.

Часто используется **денситометрический** (спектроденситометрический) **метод измерения**, при котором с помощью логарифмического фотодетектора непосредственно измеряют оптическую плотность образца. Соответствующие приборы – денситометры – обычно имеют спектральную характеристику, близкую к спектру чувствительности зрения, реализуемую с помощью светофильтров.

Измерение пропускания (или оптической плотности) рассеивающих материалов производят обычно с помощью опти-

ческих интеграторов типа шара Ульбрихта, устанавливаемых непосредственно за образцом. Объект освещается либо коллимированным (например, лазерным) пучком лучей, либо диффузным, полученным с помощью дополнительного рассеивателя (молочное стекло, диффузор в виде полый сферы и т.д.).

Измерения могут выполняться, как и в случае определения всех других оптических характеристик, в широком спектральном диапазоне или в монохроматическом излучении, естественном или поляризованном свете, при различной интенсивности (в экспериментах по нелинейной, силовой оптике) и геометрии падения (приема) лучей.

Индикатрисы рассеяния света регистрируют с помощью гониофотометров. Точность измерения достигает 1 ... 2 % и менее при тщательной подготовке аппаратуры, угловое разрешение от 10" до 2°.

Метрологическое обеспечение измерения коэффициентов пропускания или оптической плотности основано на использовании высокостабильных нейтральных или цветных светофильтров, эталонах оптической плотности (с диапазоном ослабления до 5 ... 6 порядков, т.е. с плотностью до 5 ... 6 Белл).

1.3.5. Измерение показателя преломления

В зависимости от используемого физического принципа методы измерения показателя преломления можно разделить на оптико-геометрические, интерференционные, рефлектометрические и иммерсионные.

Оптико-геометрические методы основаны на использовании законов преломления света. Например, если образец имеет форму призмы с углом при вершине α_0 (рис. 1.6, а), то показатель его преломления связан с экспериментально определяемым с помощью гониометра углом i , соответствующим ходу луча в призме параллельно ее основанию, соотношением

$$n = \sin[1/2(i' + i)] / [\sin(i/2)].$$

Автоколлимационный вариант метода (рис. 1.6, б) базируется на измерении угла i , при котором совпадают направления падающего и отраженного лучей. Выходная грань призмы обычно алюминирована.

В способе скользящего падения лучей (рис. 1.6, в) углу падения придается максимальное значение ($i = 90^\circ$), источник располагается в плоскости входной грани призмы. Пучок лучей от источника конечных размеров всегда дивергирован, т.е. содержит лучи, распространяющиеся в пределах некоторого телесного угла. При этом за счет эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) наблюдатель видит резкую границу светлого и темного полей. Положение ее соответствует условию ПВО для лучей, падающих из призмы на границу среда-воздух.

Погрешность измерения оптико-геометрическими методами обычно $10^{-5}n$ при использовании гониометров, определяющих углы с точностью 1 ... 5". Размер призм 20 ... 40 мм, угол $i = 60^\circ$.

Для измерения малых разностей показателей преломления используют дифференциальные рефрактометры (рис. 1.6, г). При равенстве показателей преломления $n_1 = n_2$ луч выходит из блока призм без отклонения. При наличии разности $\Delta n = n_1 - n_2$ луч отклоняется. Это отклонение Δx связано с расстоянием от призмы l до анализатора изображения соотношением

$$\Delta n = \Delta x / (l \operatorname{tg} i).$$

Погрешность составляет $\pm 10^{-7}$ при $l = 10^3$ мм.

При использовании полых призм возможно измерение показателей преломления жидкостей и газов. Для измерения спектральных показателей преломления, в том числе в УФ- и ИК-областях спектра, используют соответствующие приемники и источники излучения в сочетании со спектрофотометрами или светофильтрами.

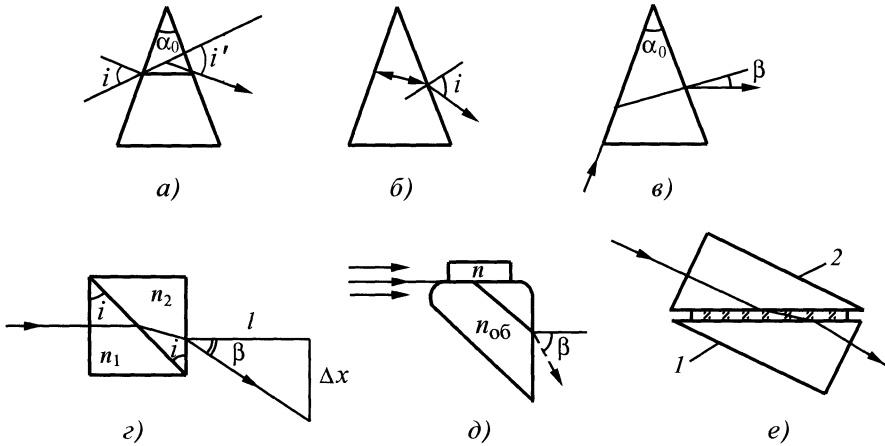


Рис. 1.6. Схемы рефрактометрических методов:

a – преломляющей призмы; *б* – автоколлимационной призмы;
в – скользящего падения лучей; *г* – дифференциальный; *д* – Пульфриха; *е* – Аббе;
l – контролируемая призма; *2* – осветительная призма

Метод призмы реализован в ряде конструкций специальных приборов (Ченса, Джелли и т.д.), из которых наиболее распространены рефрактометры Пульфриха и Аббе, основанные на методе предельного угла.

В рефрактометре Пульфриха (рис. 1.6, *д*) образец с помощью иммерсионной жидкости устанавливают на измерительной призме с известным показателем преломления $n_{об}$. По измеренному углу β , характеризующему положение границы раздела, определяют показатели преломления образца по формуле

$$n = \sqrt{n_{об}^2 - \sin^2 \beta}.$$

Образец может быть помещен в термостатическую кювету.

Погрешность метода порядка $10^{-5}n$.

В рефрактометре Аббе (рис. 1.6, *е*) введена дополнительная (осветительная) призма, что позволяет, в частности, измерять показатели преломления жидких и твердых сред в белом свете с помощью специального компенсатора хроматизма

(призмы Амичи).

Этот компенсатор позволяет измерять и дисперсию образцов, в том числе термостатированных.

Существуют также рефрактометры предельного угла с неподвижными оптическими элементами, так называемые погружные, применяемые для экспресс-анализа жидкостей.

Интерференционные методы рефрактометрии основаны на измерении малых разностей показателей преломления, вызывающих соответствующее изменение оптической длины хода лучей, проходящих через эталонный и рабочий образцы. Используются стандартные схемы интерферометров Релея, Жамена, Майкельсона, Тваймена. Разработаны голографические интерферометры, а также близкие к ним по принципу действия оптические томографы. Последние позволяют, в частности, восстанавливать профиль показателя преломления в объекте по результатам его зондирования лазерным лучом с разных направлений. Так измеряют профиль показателя преломления в оптических волокнах, газовых струях и других объектах.

Интерференционные рефрактометры применяют в основном для анализа показателей преломления жидкостей и газов – в аэродинамике, в газоанализе и т.д. Чувствительность достигает 10^{-9} для газов и 10^{-8} для жидкостей при условии хорошего термостатирования кювет и достаточной их длины (3 ... 5 м).

Рефлектометрические методы рефрактометрии. Исследование интенсивности и поляризации света, отраженного от границы раздела сред, позволяет измерять показатели преломления неоднородных анизотропных и сильно поглощающих сред, тонких пленок и поверхностных слоев. Метод не требует специальной подготовки образца, причем локальность контроля составляет до 0,01 мм.

Существуют фотометрический и эллипсометрический варианты данного метода.

В первом случае измеряют коэффициенты отражения ρ_p и ρ_s для света, поляризованного соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости падения, а также для неполяризованного света $\rho_{\text{нп}}$.

В эллипсометрическом варианте измеряют скачки фаз φ_p и φ_s , их разность

$$\Delta = \varphi_p - \varphi_s,$$

а также отношение амплитуд A_p и A_s отраженного света для p - и s -поляризации, т.е.

$$\psi = \arctg \sqrt{A_p / A_s}.$$

Энергетические и поляризационные характеристики отраженного света зависят от состояния поляризации падающей световой волны, угла падения лучей i на поверхность и показателя преломления сред. Обычно различают внешнее (свет падает на среду из воздуха, $n_{21} > 1$) и внутреннее отражение ($n_{21} < 1$).

Зависимость ρ_p , ρ_s и $\rho_{\text{нп}}$ от угла падения света для внешнего и внутреннего отражения показана на рис. 1.7. Значения характерных углов Брюстера i_B (полной поляризации) и предельного i_c определяются выражениями

$$i_B = \arctg n_{21} \quad \text{и} \quad i_c = \arcsin n_{21}.$$

Видно, что крутизна зависимости $\rho = \rho(i)$ для ПВО существенно выше, что определяет большую точность этого метода.

Таким образом, зная показатель преломления одной из сред и измерив один из параметров, описанных выше, можно определить показатель преломления второй среды.

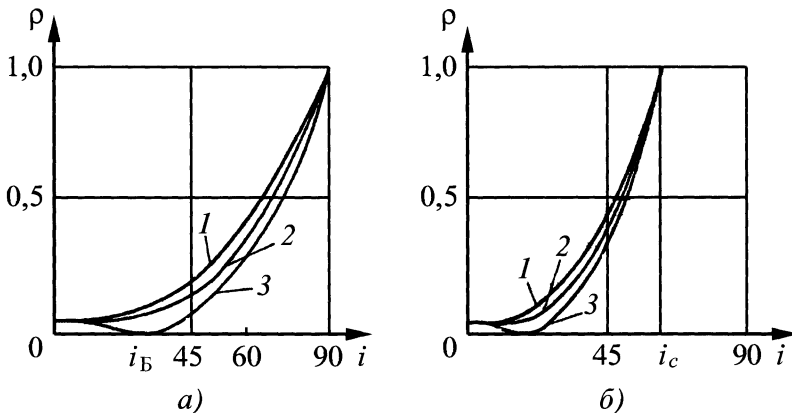


Рис. 1.7. Закономерности отражения света:

a – свет падает из воздуха; *б* – свет падает на поверхность раздела из среды с большим показателем преломления; 1 – свет поляризован ортогонально плоскости падения; 2 – свет поляризован в плоскости падения; 3 – свет не поляризован

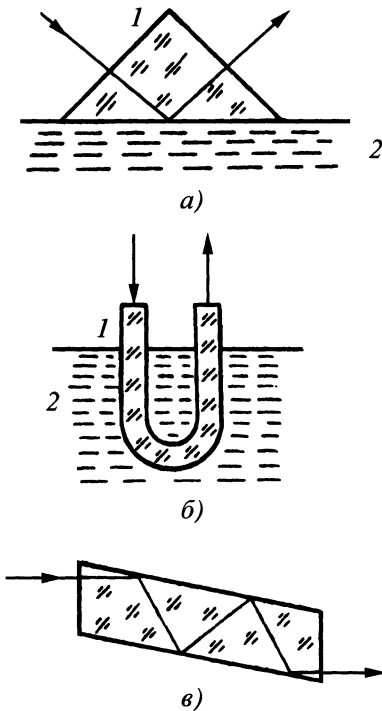


Рис. 1.8. Схемы фотометрических рефрактометров ПВО:

a – призмный; *б* – световодный;
в – с плоскопараллельной пластиной

Отношение комплексных коэффициентов отражения имеет вид

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_p / \bar{\rho}_s = \operatorname{tg} \psi \exp(i\Delta).$$

Комплексный показатель преломления среды N вычисляют по известному значению показателя преломления n и величине k .

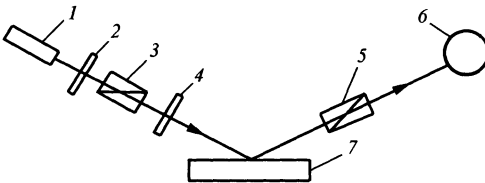


Рис. 1.9. Схема эллипсометра:

1 – лазер; 2, 4 – компенсаторы;
3 – поляризатор; 5 – анализатор;
6 – фотоприемник; 7 – образец

При анализе анизотропных сред следует фиксировать ориентацию оптической оси кристалла.

На рис. 1.8 показаны типовые схемы измерения показателя преломления фотометрическим методом внутреннего отражения (наиболее точным) с помощью призмы ПВО, световода и приставки с многократным отражением (МПВО).

При анализе поглощающих сред необходимо измерение по крайней мере двух независимых параметров отраженного света: ρ_p или ρ_s при двух углах падения (i); ρ_p/ρ_s при двух углах i и т.д.

При известной спектральной зависимости $\rho(\lambda)$, n_2 и k_2 могут быть вычислены с помощью соотношения Крамерса–Кронинга.

При определении ρ при внешнем отражении используют стандартные фотометрические устройства и приемы (приставки зеркального отражения типа ПЗО-1 к спектрофотометрии и др.).

Схема эллипсометра для измерения n показана на рис. 1.9.

Вращая, например, поляризатор 3 и анализатор 5 при фиксированном компенсаторе 4 добиваются минимального сигнала фотоприемника и отсчитывают соответствующие значения эллипсометрических параметров Δ и ψ .

Современные фотоэлектрические эллипсометры работают с лазерами на гелий-неоне ($\lambda = 0,063$ мкм), на CO_2 ($\lambda = 10,6$ мкм) и обеспечивают точность измерения показателя преломления до $10^{-5}n$.

Для непрерывного измерения показателя преломления в промышленности чаще всего используется дифференциальный гониометрический метод, метод ПВО или фотометрический.

Иммерсионный метод. В этом методе показатель преломления исследуемого вещества находится сравнением со средой с известным показателем преломления.

Особенно удобен этот метод при анализе мелких образцов (порошки, зерна микрокристаллов и т.п.). Проба помещается в жидкость, показатель преломления

которой плавно изменяется (нагревом, разбавлением и т.п.) до момента равенства с показателем преломления образца. Критерием является появление характерной полосы Бекке на границе объекта, его "исчезновение" (метод нулевого контраста), появление характерной окраски при освещении белым светом (эффект Христиансена), появление дифракционных картин (метод Обреимова) и т.п.

Погрешность метода порядка $10^{-3}n$. Основная область применения – контроль стекол, кристаллов, минералогия, криминалистика, биология.

1.3.6. Измерение коэффициента излучения

Интегральный коэффициент излучения измеряют радиационным, калориметрическим и рефлектометрическим методами.

Радиационный метод (рис. 1.10) основан на сравнении энергетической светимости объекта и эталона с известным ε , находящихся при одной температуре. Если используется приемник излучения с линейной характеристикой

$$\varepsilon = \varepsilon_0 a / a_0,$$

где ε_0 – коэффициент теплового излучения эталона; a и a_0 – соответственно сигналы приемника при визировании образца и эталона.

Часто в качестве эталона используют АЧТ ($\varepsilon_0 = 1$). Для уменьшения погрешности измерений целесообразно использовать эталоны с $\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon$.

В качестве эталонов с большим коэффициентом излучения можно использовать, кроме АЧТ, материалы, покрытые сажей, специальными эмальями и красками.

Для эталонов с малым ε_0 используют полированные металлы и другие материалы с высоким коэффициентом отражения (малым коэффициентом поглощения).

Погрешность измерений складывается из погрешностей значения ε_0 , неста-

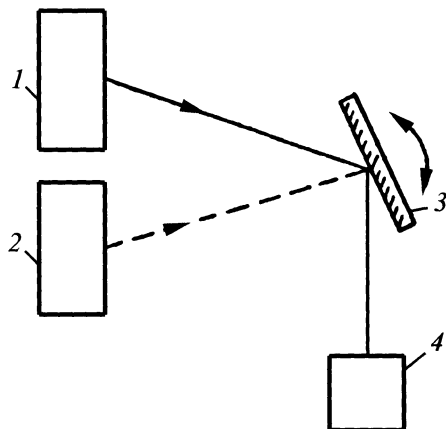


Рис. 1.10. Схема радиационного метода измерения излучательной способности:

1 – эталон; 2 – образец; 3 – зеркало;
4 – пирометр

бильности аппаратуры и других и составляет для радиационного метода в среднем 5 ... 10 %.

При измерениях ε обычно используют тепловые приемники излучения, отличающиеся неселективностью спектральных характеристик в широком диапазоне длин волн (обычно 0,5 ... 20 мкм), например болометры, термоэлементы, пироэлектрики.

Калориметрический метод измерения ε основан на определении количества теплоты, выделяемой нагретым телом в виде лучистой энергии, и последующим вычислением коэффициента излучения по соответствующему уравнению теплового баланса.

В стационарном варианте метода рассматривают установившийся теплообмен между образцом и внутренней поверхностью теплоизолированной камеры с зачерненными стенками, в которую он помещается.

Преимущество метода – отсутствие образцов сравнения.

При отсутствии теплообмена из-за конвенции и теплопроводности (камера обычно вакуумируется и охлаждается, а

образец подвешивается на подвесках, обеспечивающих его теплоизоляцию) количество теплоты, переданное образцом в окружающее пространство,

$$Q = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_1^4),$$

где F – площадь поверхности образца; T и T_1 – соответственно температура образца и стенок камеры; σ – постоянная. Зная F , T и T_1 (измеряемые обычно прецизионными терморезисторами), а также энергию, необходимую для поддержания температуры T образца в условиях эксперимента, вычисляют ε .

В нестационарном варианте метода фиксируют динамику остывания образца после выключения источника нагрева (лазер, электроннагреватель и т.п.). Если образец площадью S выполнен в виде тонкой пластинки, то

$$\varepsilon = mc\Delta T / \sigma S (T^4 - T_1^4) \Delta t,$$

где m – масса образца; c – теплоемкость его материала; T – начальная температура образца; T_1 – температура камеры; ΔT – изменение температуры образца за время Δt .

Рефлектометрический метод применяется в основном для непрозрачных материалов и основан на вычислении по соотношению

$$\varepsilon = 1 - \rho.$$

При этом ρ определяется одним из описанных выше способов с учетом требований к оптико-геометрическим условиям проведения испытаний (значение угла падения и апертуры освещающего луча, телесный угол приема излучения и т.п.). Для уменьшения влияния фоновых засветок источник света обычно модулируют. При использовании относительного метода измерений в качестве образцов сравнения используют объекты, имеющие оптические характеристики, близкие к аналогичным характеристикам объекта.

Измерение диффузного коэффициента отражения наряду с использованием оптических интеграторов (шар Ульбрихта

и т.п.) возможно на основе метода частичных коэффициентов отражения. Метод основан на измерении спектральной плотности энергетической светимости пучков лучей, отраженных от эталона и объекта под равными углами, вычисления соответствующих коэффициентов отражения и их пространственной суммиции. Измерения проводят обычно на гониофотометрических установках, оптически сопряженных с монохроматорами.

Погрешность измерения ε_λ составляет обычно 5 ... 10 %.

1.4. ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

В основе геометрической оптики лежат законы:

1) прямолинейного распространения – в оптически однородной прозрачной среде излучение распространяется по прямым линиям;

2) независимости пучков лучистого потока – отдельные пучки лучей распространяются независимо друг от друга, как будто других пучков не существует;

3) отражения – луч, падающий на отражающую поверхность, нормаль к этой поверхности в точке падения луча и отраженный луч лежат в одной плоскости, причем угол падения равен углу отражения по абсолютному значению, но противоположен по знаку.

Рассмотрим некоторые свойства простейших линзовых и зеркальных оптических систем. Оптические свойства линз зависят от параметров образующих их поверхностей, а также от соотношения между показателем преломления материала линзы и показателем преломления окружающей среды. Так, соотношение между расстояниями от тонкой линзы со сферическими преломляющими поверхностями, находящейся в воздухе до предмета s и от линзы до изображения s' (рис. 1.11) определяется как

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f'} = \varphi',$$

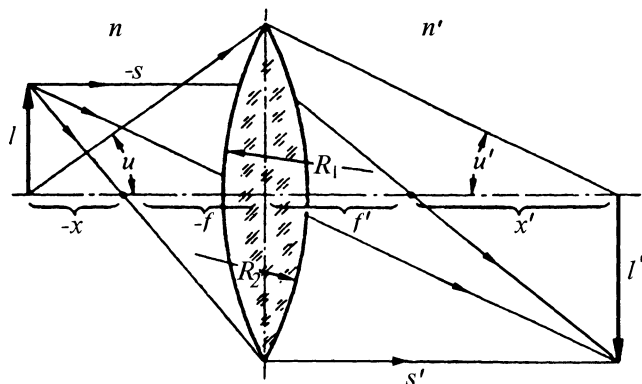


Рис. 1.11. Образование оптического изображения тонкой линзой

где f' – фокусное расстояние линзы; f' – ее оптическая сила; R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы; n – показатель преломления материала линзы.

Здесь используется принятое в геометрической оптике правило знаков. Предполагая, что излучение распространяется слева направо, будем считать это направление положительным. Для отрезков s и s' началом отсчета будем считать вершину (точку пересечения с оптической осью) преломляющей или отражающей поверхности. Отрезок считается положительным, если его можно получить перемещением точки от вершины по ходу распространения излучения. То же самое относится и к другим линейным величинам (радиусы кривизны, фокусные расстояния и т.п.).

Отрезки, откладываемые от оптической оси в перпендикулярном ей направлении, считаются положительными, если они откладываются вверх от оси, и отрицательными, – если вниз. Углы, образованные оптической осью и лучом, считаются положительными, если для совмещения луча с осью его требуется повернуть против хода часовой стрелки, и отрицательными при повороте по ходу часовой стрелки.

Для проведения габаритных расчетов оптических систем удобным является представление об идеальной (гауссовой)

оптической системе, основанной на предположении, что каждая точка или отрезок прямой изображается также точкой или отрезком прямой.

Практически теория идеальной оптической системы применима для построения изображений только в меридиональной или сагиттальной плоскости центрированной оптической системы. Реальные системы удовлетворяют условиям идеальной системы только в области нулевых (параксиальных) лучей – лучей, образующих с оптической осью бесконечно малые углы и пересекающих оптические поверхности на бесконечно малых высотах. Введение понятия идеальной системы позволяет значительно упростить габаритные расчеты и дает возможность оценить погрешности реального изображения.

Приведем формулы углового γ , поперечного (линейного) β и продольного α увеличений для идеальной системы, находящейся в однородной среде (см. рис. 1.2):

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{s}{s'} = \frac{x}{f'} = \frac{f}{x'}$$

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}, \quad \alpha = \frac{dx'}{dx} = -\beta^2 \frac{f'}{f}$$

где u, u' – углы, под которыми видна линза соответственно из точки предмета на оси и сопряженной ей точки изображения;

l, l' – поперечные размеры предмета и изображения; x, x' – расстояние от фокусов до предмета и изображения соответственно.

Очевидно, что $\alpha\gamma = \beta$, а для системы, находящейся в воздухе, когда $f' = -f$, $\alpha = \beta^2$, $\beta\gamma = 1$.

Для малых углов действует условие Лагранжа–Гельмгольца

$$nlu = n'l'u',$$

которое для идеальной оптической системы можно написать в следующем виде:

$$nltgu = n'l'tgu'.$$

Систему из нескольких линз можно заменить одной эквивалентной линзой. Так, действие оптической системы из двух тонких линз эквивалентно действию одной линзы с фокусным расстоянием

$$f = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d},$$

где f_1' и f_2' – фокусные расстояния линз, а d – расстояние между линзами.

Условие Лагранжа–Гельмгольца действительно и для зеркальной отражающей поверхности. В этом случае $n = -n'$ и, следовательно,

$$lu = -l' u'.$$

Для сферического зеркала формулой связи между координатой предмета s , координатой изображения s' и радиусом кривизны R отражающей поверхности является выражение

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f'},$$

т.е. фокусное расстояние равно половине радиуса. Формулы увеличений, приведенные выше, сохраняют свою силу и для зеркала (с учетом правил знаков).

Теория идеальной оптической системы не учитывает влияния реальных размеров линз, зеркал и других элементов на процесс образования изображения. Все реальные системы ограничены по своим габаритам, т.е. телесные углы, в которых

распространяются входящие в систему и выходящие из нее лучи, ограничены. Устройства, ограничивающие пучки лучей в оптической системе, называются *диафрагмами*.

Диафрагма, ограничивающая наибольшим образом размеры пучков лучей, исходящих от объекта и поступающих на вход системы, называется действующей, или апертурной, а ее изображение в пространстве предметов называется *входным зрачком системы*. Изображение входного зрачка, полученное на выходе оптической системы, называется *выходным зрачком*.

Как следует из определения, входной зрачок системы определяется размером той диафрагмы (или ее изображения в пространстве объектов), которая видна из точки предмета под наименьшим углом. Этот угол обычно называют *апертурным*. Размеры входного зрачка определяют количество лучистой энергии, собираемой оптической системой.

Кроме входного и выходного зрачков, на ограничение пучков лучей оказывают влияние и другие диафрагмы. Так, если построить в пространстве предметов изображения всех диафрагм, то очевидно, что угол раствора лучей, входящих в систему, определяется размером изображения диафрагмы, которая видна из центра входного зрачка под наименьшим углом. Эту диафрагму называют обычно *диафрагмой поля зрения*, так как она определяет угол поля зрения системы.

Действие диафрагм сводится прежде всего к так называемому *виньетированию* – срезанию пучков. Для разных значений l количество энергии, попадающее в систему, будет меняться.

Помимо виньетирования такого рода, называемого обычно геометрическим, существует абберационное виньетирование, возникающее из-за наличия в реальных оптических системах аббераций погрешностей изображения элементарных (чаще всего точечных) объектов. Абберационное виньетирование заключается в том, что величина изображения одной и той же

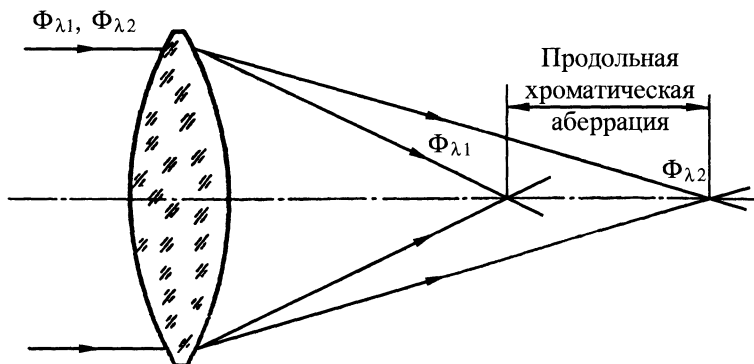


Рис. 1.12. Продольная хроматическая aberrация

диафрагмы, например, входного зрачка, создаваемого осевым и наклонным пучками лучей, получается различной, т.е. в зависимости от угла падения лучей меняется площадь выходного зрачка. Поэтому, если размеры выходного зрачка рассчитаны по теории идеальной оптической системы, сечение пучка, увеличившееся из-за aberrаций, будет частично виньетироваться зрачком.

Аберрации обычно разбивают на две группы: хроматические и монохроматические. Сущность первых заключается в том, что в результате дисперсии в линзовых системах фокусные расстояния и увеличения для различных длин волн различны. Из-за этого изображения объекта для разных длин волн (цветов) не совпадают

друг с другом по их положению на оптической оси (хроматизм положения), а также по величине (хроматизм увеличения). Эти aberrации называют также продольными (рис. 1.12) и поперечными (рис. 1.13) хроматическими aberrациями. Полностью хроматизм не устраняется; возможно лишь совместить изображения для двух различных длин волн. Исправление хроматизма обычно проводят для тех длин волн, которые лежат сравнительно близко от границ спектрального диапазона работы оптической системы.

Монохроматические aberrации также принято делить на отдельные группы, причем действие их обычно рассматривается независимо друг от друга.

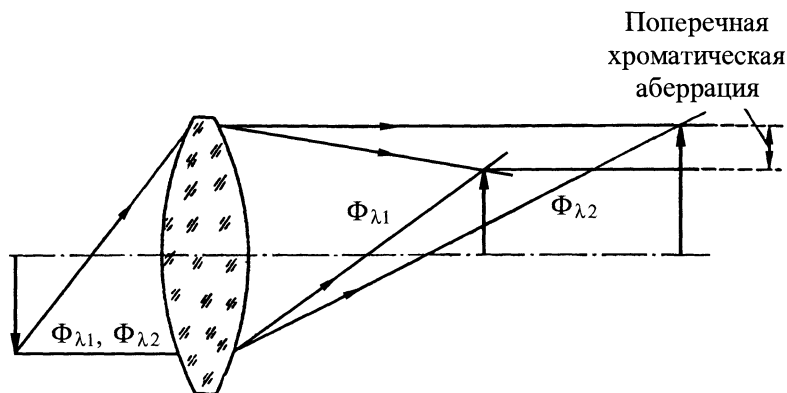


Рис. 1.13. Поперечная хроматическая aberrация

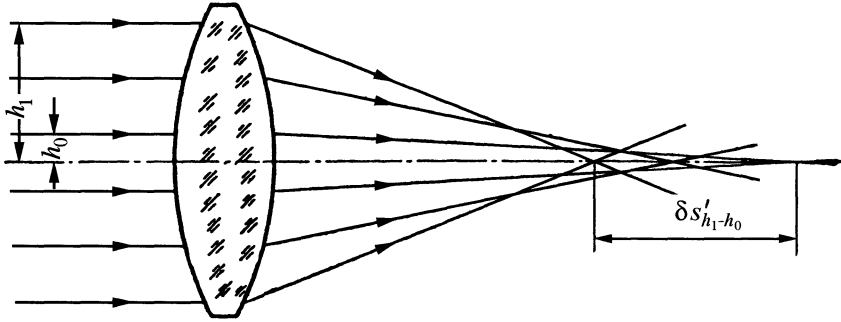


Рис. 1.14. Сферическая aberrация

Сферическая aberrация образуется из-за того, что лучи, проходящие через входной зрачок на различных расстояниях h от оптической оси, после преломления или отражения в системе пересекают ось в различных точках (рис. 1.14). В результате этого в плоскости изображения вместо точек получаются размытые изображения – кружки рассеяния. Радиус кружка рассеяния определяет поперечную сферическую aberrацию, а разница в расстоянии вдоль оси для реального изображения и изображения в идеальной системе $\delta s'_{h_1-h_0}$ называется продольной сферической aberrацией.

сферической aberrацией.

Кома – aberrация, заключающаяся в нарушении осевой симметрии наклонных пучков. Лучи от точечного объекта, падающие на входной зрачок под углом к оптической оси, создают изображение как бы в виде серии кружков, получаемых от различных зон входного зрачка. Наложение всех таких кружков дает размытое изображение (рис. 1.15). Значение комы прямо пропорционально квадрату относительного отверстия системы $(D_{\text{вх}}/f')^2$ и тангенсу угла падения лучей на входной зрачок.

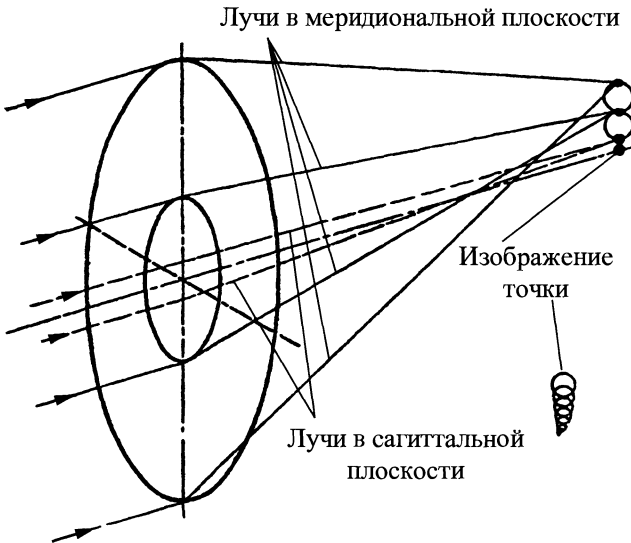


Рис. 1.15. Кома

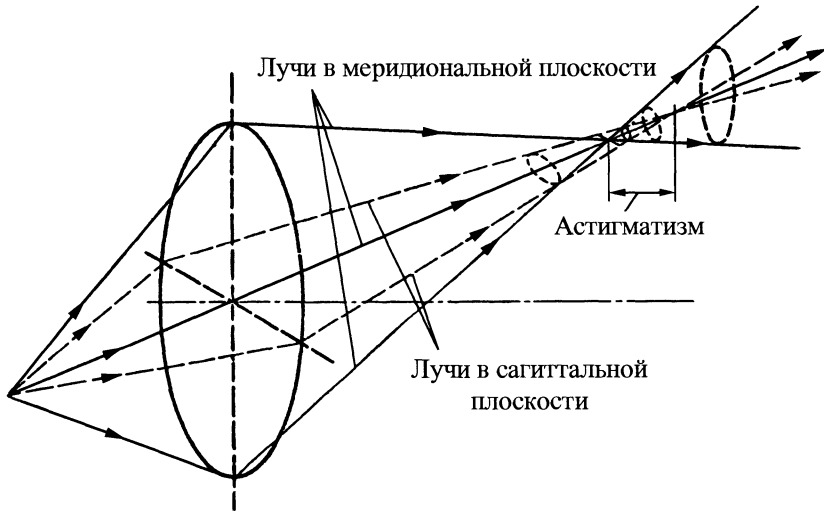


Рис. 1.16. Астигматизм

Другую группу монохроматических aberrаций составляют так называемые *полевые aberrации* (aberrации узких пучков при наклонном ходе лучей). К ним относится астигматизм, кривизна поля (кривизна изображения) и дисторсия.

Астигматизм – возникает из-за того, что лучи, проходящие через меридиональную плоскость, пересекаются в фокальной плоскости на линии, перпендикулярной меридиональной плоскости (рис. 1.16). Соответственно лучи, идущие в сагиттальной плоскости, пересекаются на линии, перпендикулярной ей. Расстояние между этими двумя линиями определяет величину астигматизма. Астигматизм особенно заметен при увеличении угла падения лучей на входной зрачок. Точка в результате астигматизма изображается в виде эллипса, причем разность между большой и малой осями эллипса пропорциональна относительному отверстию системы $D_{\text{вх}}/f'$ и квадрату тангенса угла падения лучей на входной зрачок.

Кривизна поля заключается в том, что система даже при отсутствии сферической aberrации, комы и астигматизма дает изображения удаленных точечных источников, находящихся на различных

угловых расстояниях от оптической оси, на некоторой поверхности, обладающей кривизной и касающейся фокальной плоскости только на оптической оси (в точке фокуса). Поэтому на краях поля зрения изображение оказывается размытым. Радиус кружка рассеяния, возникающего в результате этого явления, пропорционален относительному отверстию и квадрату тангенса угла падения пучка на зрачок.

Дисторсией называется неодинаковое увеличение системы по полю зрения. Вследствие дисторсии объект в форме квадрата 1 будет изображаться в виде "подушки" 2 (рис. 1.17), если увеличение на краю поля зрения больше, чем в центре, или в виде "бочки" 3, если имеет место обратное соотношение. Смещение точки от положения, соответствующего идеальной оптической системе, пропорциональ-

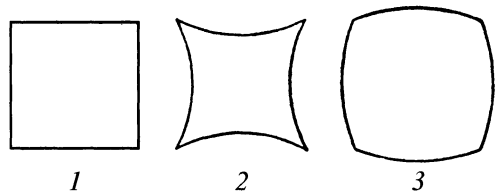


Рис. 1.17. Дисторсия

но третьей степени тангенса угла падения лучей на входной зрачок.

Устранение aberrаций (коррекция оптической системы) может вестись различными способами: подбором оптических материалов, выбором радиусов и толщин отдельных элементов, наконец, соединением в одну систему компонентов с aberrациями обратных знаков и введением асферических поверхностей. В хорошо скорригированной системе мини-

мальный размер кружка рассеяния определяется не aberrациями, а дифракцией; например, для случая системы с круглым выходным зрачком

$$\rho_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D_{\text{вых}}} f'.$$

Это выражение действительно для монохроматического излучения с длиной волны λ .

СТРУКТУРА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ ОНК

2.1. СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОНК

Средства оптического контроля содержат осветитель, приемник излучения, устройство сканирования объекта и блок обработки сигналов и управления (ПЭВМ, микропроцессор и т.д.).

Осветитель состоит из источника света с блоком питания и необходимых для реализации конкретного режима освещения оптических элементов (конденсоры, светофильтры, модуляторы, растры, диффузоры, дефлекторы, объективы, поляриды, световоды и т.д.).

При работе в отраженном излучении (или при комбинированном освещении) осветитель располагается по одну сторону с приемником излучения относительно объекта контроля.

В обоих случаях контроль может производиться, в зависимости от конкретной задачи и специфики объекта, при освещении по методам темного или светлого поля, в различных спектральных диапазонах (УФ, ИК, ВИ), в поляризованном или естественном свете, при стационарном, модулированном или импульсном режиме излучения источника. Различают также освещение источниками направленного (лазер, коллиматор) и диффузного (лампа с диффузором) излучения.

Анализатор изображения (телевизионная камера, фотодиодный датчик и т.п.) состоит из оптической системы и фотодетектора. Оптическая система включает обычно объектив для фокусировки изображения объекта на фотоприемник или преобразователь изображения, а также вспомогательные элементы (фильтры, дефлекторы или сканаторы, модуляторы,

световоды и т.п.).

Эффективность использования в производственных условиях средств неразрушающего контроля определяется их достоверностью, надежностью и производительностью. В некоторых случаях возникает необходимость контроля объектов с большой площадью (несколько десятков квадратных метров), реализации сложных математических моделей контроля, обработки большого объема информации. Осуществить все эти функции без автоматизации процесса контроля невозможно.

В литературе описаны системы, обеспечивающие автоматизацию процесса ОНК, который включает в себя выбор оптимальных режимов съема информации с поверхности объекта контроля; определение уровня порогового сигнала; вычисление координат дефектов и их размеров, документирование результатов контроля. Обобщенная функциональная схема автоматической системы ОНК показана на рис. 2.1. Контроль с помощью этой системы осуществляется следующим образом.

Контролируемый объект 2 подвергается воздействию со стороны источника оптического излучения (ИОИ). Поверхность объекта становится источником излучения, поступающего в оптическую систему и на приемник излучения 5. Сканирующее устройство 4 перемещает излучатель 1 с постоянной скоростью вдоль контролируемой поверхности, а также непрерывно обследует заданную траекторию. Блок 6 автоматически подбирает оптимальное время регистрации для каждого типа контролируемого изделия.

Электронный блок 7 непосредственно управляет устройством 4, блоком 6, дефектоотметчиком 3, отмечает контур дефекта на поверхности контролируемого

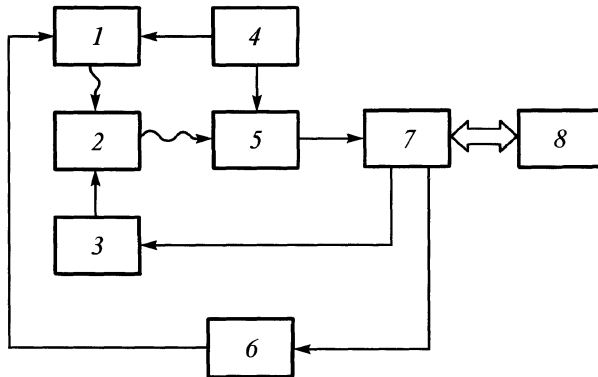


Рис. 2.1. Обобщенная функциональная схема автоматической системы оптического неразрушающего контроля:

1 – источник оптического излучения; 2 – объект контроля; 3 – дефектоотметчик; 4 – сканирующее устройство; 5 – оптическая система и приемник излучения; 6 – устройство выбора режима регистрации; 7 – электронный блок; 8 – ЭВМ

объекта. Для обработки результатов контроля в состав системы ОНК входит ЭВМ 8.

В качестве ИОИ используют кварцевые галогенные лампы, когерентные излучатели (лазеры) и т.п. Достоверность контроля в немалой степени зависит от ИОИ, облучающего поверхности контролируемого объекта.

Основными параметрами ИОИ являются плотность лучистого потока, равномерность и размеры зоны облучения. Для обнаружения дефектов малых размеров ИОИ должны отличаться высокой равномерностью облучения, так как неравномерно освещенные участки могут быть классифицированы как ложные дефекты. При 2 %-й чувствительности контроля неравномерность не должна превышать 3 %.

Оптические средства в системах ОНК собирают и фокусируют поток лучистой энергии на чувствительном элементе приемника излучения. Они могут быть выполнены в виде зеркального или линзового объектива. Зеркальные объективы используются при предъявлении высоких требований к чувствительности, а линзовые – при необходимости высокого гео-

метрического разрешения. На практике чаще используются зеркальные объективы, которые проще в изготовлении и, следовательно, дешевле. В зависимости от размеров, конструкции контролируемых объектов могут применяться телескопические, микроскопические и нормальные объективы. Основными параметрами объективов являются фокусное расстояние, диаметр, угловое поле, разрешающая способность. Если доступ к объекту контроля затруднен, то в качестве оптической системы следует использовать зеркальные или волоконные световоды.

Главным элементом оптической системы ОНК является приемник излучения, который преобразует излучение в электрический сигнал. Главным параметром приемника излучения (ПИ) является пороговый поток излучения $\Phi_{\text{пор}}$ ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \text{Гц}^{-1/2}$).

Пороговый поток – это минимальный поток, который вызывает на выходе приемника сигнал, превышающий уровень шума. Очень часто используют величину, обратную пороговому потоку – *обнаружительную способность*.

К основным параметрам ПИ также относятся *спектральная чувствительность, постоянная времени и рабочая*

температура. Спектральная чувствительность ПИ характеризует эффективность приема излучения в зависимости от его спектра. Постоянная времени определяет частотные характеристики ПИ.

Сканирующее устройство перемещает с постоянной скоростью оптическую ось системы по одной или двум взаимно перпендикулярным координатам. В зависимости от конструкции оптико-механического сканирующего устройства траектория сканирования может быть спиральной, розеточной, прямоугольной и др. В системах ОНК используют сканирующие устройства на основе колеблющихся плоских зеркал, вращающихся зеркальных призм, барабанов, пирамид, преломляющих клиньев. Важным параметром сканирующего устройства является количество строк, просматриваемых в единицу времени. От прилегания просматриваемых строк друг к другу зависит качество получаемой картины объекта, а от времени нахождения визируемого участка объекта контроля в мгновенном поле зрения прибора – ее информативность. Время нахождения в мгновенном поле зрения прибора t_c должно превышать постоянную времени ПИ t_n , т.е. $t_c > kt_n$, где k – коэффициент запаса (обычно принимают $k = 2$).

К числу наиболее важных параметров сканирующих устройств можно отнести максимальный угол сканирования, частоту вращения барабана или качания зеркала, размеры пятна сканирования.

Электрический сигнал с выхода ПИ поступает в электронный блок, где усиливается и обрабатывается. Электронный блок определяет уровень порогового сигнала и подавляет помехи, возникающие в процессе контроля. Помехи могут быть вызваны неравномерным облучением объекта контроля вдоль траектории сканирования, изменением расстояния от источника до поверхности контролируемого объекта, случайным изменением оптико-физических характеристик объекта, изменением напряжения питания и т.п. Слу-

чайные помехи можно подавлять фильтрованием суммарного сигнала и выделением полезного сигнала, вызванного дефектом.

Дефектоотметчик должен иметь достаточно простую конструкцию и малую инерционность для разметки контура дефекта с высокой скоростью и перемещения синхронно со сканирующим устройством. Наличие дефектоотметчика позволяет оперативно оценивать обнаруженный дефект.

Наличие ЭВМ позволяет накапливать, хранить и документировать данные контроля, реализовывать сложные алгоритмы определения геометрических характеристик дефектов, определять координаты и площадь дефектов.

Первичная обработка измерений. Флуктуация сигнала на выходе приемника излучения (ПИ) обусловлена помехами от фоновых источников засветки и объекта контроля и требует устранения в автоматических системах ОНК, что приводит к необходимости первичной обработки данных.

Первичная обработка (ПО) данных состоит в выполнении следующих операций: устранение аномальных ошибок данных; сглаживание (фильтрация, прогноз); сжатие данных; калибровка данных; исключение систематических ошибок; дифференцирование по времени; упорядочивание данных по требуемому принципу (сортировка); оценка статистических характеристик (ошибок) данных и т.д.

Основными задачами ПО являются: повышение достоверности данных; преобразование данных к виду, удобному для их последующей обработки; анализ характера обрабатываемых данных.

В информации, поступающей из информационно-измерительной системы, наряду с полезными сведениями содержатся погрешности измерений различной природы и характера. Наличие этих погрешностей может привести к существенным искажениям конечных результатов

обработки данных, поэтому при ПО данных необходимо уменьшить уровень погрешностей измерений.

При обработке данных, снимаемых с информационно-измерительной системы дефектоскопа, в частности, при построении математической модели оптического контраста дефекта требуется дифференцировать данные. Дифференцирование является одной из возможных операций, выполняемых для преобразования данных к виду, удобному для последующей обработки. К подобным операциям относятся также интерполирование данных, нормирование и т.п.

Анализ характера обрабатываемых данных выполняется статистическими методами. Регистрируемые данные, являющиеся результатом наблюдения совокупности физических параметров, амплитуды которых представляют собой развивающиеся во времени процессы, разделяют на фрагменты, соответствующие участкам квазистационарности и нестационарности протекания процессов, а затем проверяют наличие линейной зависимости (корреляции) между различными параметрами. Нередко здесь же оценивают статистические характеристики данных, идентифицируют шумы из смеси "полезный сигнал + шум". Полученные при этом результаты используются на этапе вторичной обработки, например, для оценки точности идентификации параметров математической модели объекта исследования.

В процессе обработки данных ЭВМ, входящая в состав системы ОНК, постоянно получает новую дополнительную информацию об их свойствах и характеристиках, что позволяет непрерывно уточнять, конкретизировать исходную модель. Естественно, что при этом можно оптимизировать применительно к новой модели структуру и параметры операторов математического обеспечения ПО.

Таким образом, первичная обработка должна обеспечивать изучение операторов преобразования данных, их подстройку

непосредственно в течение процесса обработки по мере поступления новой информации о свойствах и характеристиках обрабатываемых данных, одновременное с уточнением математической модели данных. Следовательно, ПО должна обладать свойством адаптации к характеру обрабатываемых данных. Адаптивный характер обеспечивает эффективность собственно обработки и повышает оперативность ПО, сокращая при этом время обработки данных. При этом, однако, усложняется процедура ПО, ее алгоритмическое обеспечение. Это объясняется тем, что изменение математической модели данных обуславливает необходимость использования нескольких операторов ПО, оптимальным образом реализующих одну и ту же операцию обработки (например, сглаживание, дифференцирование и т.п.) для разных вариантов (видоизменений) модели данных, либо требует применения одного адаптивного алгоритма обработки, обеспечивающего коррекцию структуры и параметров оператора обработки в соответствии с текущим изменением математической модели данных.

2.2. ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником ОИ называют устройство, предназначенное для превращения какого-либо вида энергии в ОИ (электромагнитное излучение с длинами волн $1 \dots 10^6$ нм).

Оптическое излучение отдельных атомов, ионов, молекул, а также жидких и твердых тел возникает в результате переходов их валентных (внешних) электронов из возбужденных состояний, в которые они попадают в результате поглощения энергии извне, в состоянии с меньшей энергией. Частота испускаемых при этом электромагнитных волн $\nu = (W_2 - W_1)/h$, где W_2 и W_1 – соответственно энергии начального (до излучения) и конечного состояний; h – постоянная Планка. Спектры излучения атомов и ионов в газе состоят

из отдельных спектральных линий, спектры молекул – из густо расположенных линий, переходящих в полосы, а спектры жидкостей и твердых тел носят обычно непрерывный характер.

По физической природе различают два вида ОИ: тепловое и люминесценцию. К отдельной группе ОИ относят лазерные излучения.

Тепловым называют ОИ, возникающее при нагревании тел. У твердых тел оно имеет непрерывный спектр, зависящий от температуры тела и его оптических свойств. Тепловыми излучателями являются все источники, свечение которых обусловлено нагреванием: электрические ЛН, простые угольные дуги.

Люминесценцией называют спонтанное излучение, избыточное над тепловым излучением, если его длительность значительно превышает период колебаний электромагнитной волны соответствующего излучения. Люминесценция наблюдается в газообразных, жидких и твердых телах.

Твердые или жидкие вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений, называют *люминофорами*. Спектр люминесценции может состоять из отдельных линий (излучение отдельных атомов и ионов), полос (излучение молекул) и непрерывных участков (излучение твердых тел и жидкостей). При люминесценции возможно более эффективное преобразование подводимой энергии в ОИ, чем при тепловом возбуждении, поскольку не требуется нагрева тел. В ИС используется электро-, фото- и радиолюминесценция.

Электролюминесценция – ОИ атомов, ионов, молекул, жидких и твердых тел под действием ударов электронов (ионов), движущихся со скоростями, достаточными для возбуждения. Излучение разрядных ИС (РЛ) представляет собой электролюминесценцию газов и паров. Различные виды электролюминесценции твердых тел используются в электролюминесцентных

панелях и светоизлучающих диодах. Свечение люминофоров под действием пучка электронов достаточной скорости называют катодолюминесценцией (ионов – ионолюминесценцией) и используется в электронно-лучевых трубках, кинескопах и других приборах.

Фотолюминесценция – ОИ, возникающее в результате поглощения телами ОИ. В парах и газах наблюдается множество видов фотолюминесценции, определяемых энергией поглощаемых фотонов и строением поглощающих атомов, ионов или молекул, например резонансная флюоресценция паров и газов и многие другие виды, играющие большую роль в излучении РЛ. Фотолюминесценция люминофоров широко применяется в люминесцентных и некоторых других РЛ.

Радиолюминесценция – ОИ некоторых веществ (люминофоров) под действием продуктов радиоактивного распада.

Параметры источников ОИ. Излучение ламп характеризуется потоком (световым), силой излучения (силой света), энергетической (световой) яркостью, ее распределением по поверхности светящегося тела по направлениям, спектральной плотностью вышеперечисленных параметров (спектром излучения). Цвет излучения ламп дополнительно характеризуется цветовыми параметрами: координатами цветности x и y , цветовой температурой $T_{\text{цв}}$.

Основными показателями долговечности ОИ являются полный и полезный сроки службы. Под *полным сроком службы* понимают продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента полной или частичной утраты ими работоспособности. *Полезным сроком службы* называют продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента ухода за установленные пределы одного из параметров.

2.2.1. Тепловые излучатели

Вольфрамовые лампы накаливания (ЛН) – это наиболее распространенные источники света. Главной частью является тело накала. Оно может представлять собой нить, спираль, биспираль, триспираль, иметь разнообразные размеры и форму.

Тело накала изготавливается из вольфрамовой проволоки по ГОСТ 19671–91. Вольфрам имеет высокую температуру плавления (3650 ± 50 К) и малую скорость испарения ($9,9 \cdot 10^{-3}$ г/(м² · с) при 3000 К), формоустойчив при высокой рабочей температуре, устойчив к механическим нагрузкам, обладает высокой пластичностью в горячем состоянии.

Вольфрам является селективным излучателем, максимум его излучения сдвинут по сравнению с черным телом в сторону более коротких волн при одинаковой температуре излучателей.

Спектральный коэффициент теплового излучения вольфрама увеличивается с уменьшением длины волны.

Для обеспечения нормальной работы раскаленного вольфрамового тела накала необходимо изолировать его от кислорода воздуха. Для этого тело накала нужно разместить либо в безвоздушной среде (такие лампы называются вакуумными), либо в среде так называемых инертных газов или их смесей, не реагирующих с материалом тела накала (газополные лампы).

Галогенные лампы накаливания (ГЛН). Принцип действия ГЛН заключается в образовании на стенке колбы летучих соединений – галогенида вольфрама, – которые испаряются со стенки, разлагаются на теле накала и возвращают ему, таким образом, испарившиеся атомы вольфрама.

ГЛН по сравнению с обычными лампами имеют более стабильный по времени световой поток и, следовательно, повышенный полезный срок службы, а также значительно меньшие размеры, более высокие термостойкость и механическую прочность благодаря применению кварцевой

колбы. Малые размеры и прочная оболочка позволяют наполнять лампы до высоких давлений ксеноном и получать более высокую яркость и повышенную световую отдачу (либо увеличенный физический срок службы).

Галогенная добавка в ЛН с вольфрамовым телом накала вызывает замкнутый химический цикл. При 300 ... 1200 °С пары йода соединяются на стенке колбы с частицами вольфрама, образуя йодистый вольфрам WI_2 , который испаряется при температуре выше 250 ... 300 °С. Вблизи тела накала при 1400 ... 1600 °С молекулы WI_2 распадаются и атомы вольфрама оседают на теле накала и других деталях, имеющих температуру выше 1600 °С. Освободившиеся атомы йода диффундируют в объеме лампы и соединяются на стенках колбы с вольфрамом, вновь образуя WI_2 .

Йодно-вольфрамовый цикл препятствует осаждению вольфрама на колбе, но не обеспечивает возвращения его частиц в дефектные участки тела накала. Поэтому механизм перегорания тела накала в йодных лампах остается таким же, как и в обычных ЛН.

Тело накала ГЛН изготавливают из специальных марок вольфрамовой проволоки, преимущественно в виде спирали, которой в лампе с помощью электродов и держателей придается необходимая форма.

Галогенные лампы применяются для светильников общего освещения и прожекторов; инфракрасного облучения; кинофотосъемочного и телевизионного освещения; автомобильных фар; аэродромных огней; оптических приборов; специальных применений. По конструктивным признакам ГЛН делят на две группы: с длинным спиральным телом накала при отношении длины ГЛН к диаметру более 10 – линейные (трубчатые) лампы; с компактным телом накала при отношении длины ГЛН к диаметру менее 8.

Лампы для светильников общего освещения и прожекторов выпускаются пре-

имущественно на 220 В мощностью 1 ... 20 кВт, световая отдача 22 ... 26 лм/Вт, срок службы 2000 ч, лампы трубчатые, положение горения горизонтальное.

Лампы для инфракрасного облучения выпускаются на напряжения 127, 220 и 380 В мощностью 0,5 ... 5 кВт; срок службы повышенный (2500 ... 5000 ч), так как тела накала этих ламп работают при низких температурах 2400 ... 2700 К; лампы трубчатые; положение горения горизонтальное.

Малогобаритные лампы разного назначения выпускаются на напряжения до 30 В (преимущественно 6, 12, 24 В) мощностью 15 ... 650 Вт; лампы имеют компактную форму тела накала. Поскольку от большинства этих ламп требуется высокая яркость, они выпускаются с температурой тела накала 3000 ... 3200 К и имеют срок службы несколько десятков или сотен часов; положение горения любое.

2.2.2. Разрядные лампы (РЛ)

Разрядной лампой называют лампу, в которой ОИ возникает в результате электрического разряда в газах, парах или их смесях.

РЛ имеют самую высокую световую отдачу и большой срок службы по сравнению с ЛН, а также могут иметь разнообразные спектры излучения и широкий диапазон значений мощности, яркости и других параметров.

Подбирая соответствующие наполнение и условия разряда, удается создавать высокоэффективные источники излучения практически в любой части не только видимого, но также УФ- и ИК-спектров. При этом можно получать спектры излучения, состоящие из одиночных линий, многолинейчатые и непрерывные. Это достоинство РЛ открыло им широкие возможности применения.

Разряды высокого и особенно сверхвысокого давления имеют высокую яркость, в десятки и сотни раз превосходящую яркость ЛН. Поэтому РЛ с успехом

применяются в светооптических приборах и установках. Малая инерционность излучения РЛ позволяет применять их там, где требуется модуляция излучения.

Широкое и весьма разнообразное применение находят РЛ, дающие вспышки излучения очень высокой яркости и малой длительности. Их применяют в многочисленных приборах и установках для наблюдения и изучения быстродвижущихся частей машин и механизмов (стробоскопы), фотографирования и изучения быстропротекающих процессов, аэрофото съемки, оптической дальнометрии и т.д. В последнее время РЛ широко применяют для оптической накачки лазеров.

Недостатком РЛ является сложность их включения в сеть, связанная с особенностями разряда. Для его зажигания требуется более высокое напряжение, чем для устойчивого горения. Для обеспечения устойчивого горения в цепь каждой лампы необходимо включать балласт, ограничивающий ток разряда требуемыми пределами. Другой недостаток РЛ с парами обусловлен зависимостью их характеристик от теплового режима, поскольку температура определяет давление паров рабочего вещества лампы. Номинальный режим устанавливается в них только спустя некоторое время после включения. Повторное зажигание ламп с разрядом в парах металла при высоком и сверхвысоком давлении без специальных приемов возможно только по истечении некоторого времени после выключения.

По составу газов или паров, в которых происходит разряд, РЛ делят на лампы с разрядом: в газах; в парах металлов; в парах металлов и их соединений. По рабочему давлению РЛ делят на: лампы низкого давления – примерно 0,1 ... 10^4 Па; высокого давления – $3 \cdot 10^4$... $1 \cdot 10^6$ Па; сверхвысокого давления – больше 10^6 Па. По виду разряда – на лампы дугового, тлеющего и импульсного разряда.

В зависимости от того, что является основным источником излучения, РЛ бы-

вают: газо- или паро-светные, в которых излучение вызвано возбуждением атомов, молекул или рекомбинацией ионов; фотолюминесцентные (называемые для краткости просто люминесцентные), в которых излучение создают люминофоры, возбуждаемые излучением разряда; электродосветные, в которых излучение создается электродами, раскаленными в разряде до высокой температуры. У большинства РЛ 2-го и 3-го типов к основному виду излучения примешивается излучение разряда, таким образом, они являются по существу источниками смешанного излучения.

По форме колбы РЛ со столбом подразделяются на: трубчатые или линейные РЛ в цилиндрических колбах, у которых расстояние между электродами в 2 раза и более превышает внутренний диаметр трубки; капиллярные – в трубках с внутренним диаметром меньше 4 мм; шаровые РЛ с расстоянием между электродами, меньшим внутреннего диаметра колбы или равным ему (колбы этих РЛ часто имеют форму шара или близкую к ней).

2.2.3. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающие диоды представляют собой микроминиатюрные полупроводниковые ИС, в которых излучение возникает на полупроводниковом переходе в результате рекомбинации электронов и "дырок". В светоизлучающих диодах используются полупроводниковые материалы высокой чистоты, легированные малыми количествами контролируемых примесей, создающих либо избыток электронов (материал n -типа), либо их недостаток, т.е. избыток "дырок", которые ведут себя подобно положительным зарядам (материал p -типа). В месте контакта материалов p - и n -типов образуется полупроводниковый p - n -переход. Если к p - n -переходу приложить постоянное напряжение в несколько вольт прямой полярности (т.е. к n материалу минус, а p материалу плюс), то поле будет заставлять перемещаться электроны и "дырки" навстречу друг другу

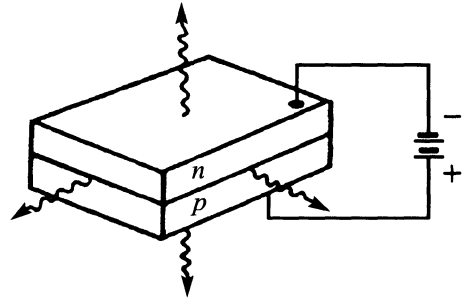


Рис. 2.2. Схема включения светоизлучающего диода на p - n -переходе

и они будут рекомбинировать в зоне контакта, частично испуская при этом фотоны (рис. 2.2).

Спектр излучения зависит от материала полупроводника и вводимой примеси (рис. 2.3). Наиболее широко применяется арсенид галлия GaAs, дающий излучение в близкой ИК-области с $\lambda_{\max} \approx 920$ нм.

В связи с разработкой так называемых антистоксовых люминофоров, преобразующих ИК-излучение в видимое, широко применяют светодиоды, дающие ИК-

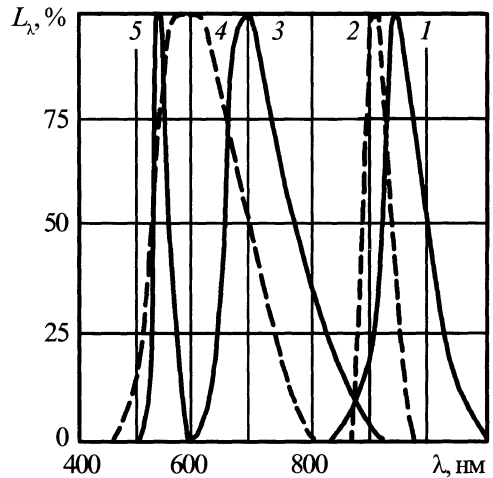


Рис. 2.3. Спектр излучения диодов, изготовленных из:
1 – арсенида галлия с кремнием; 2 – арсенида галлия; 3 – фосфида галлия; 4 – карбида кремния; 5 – арсенида галлия с антистоксовым люминофором

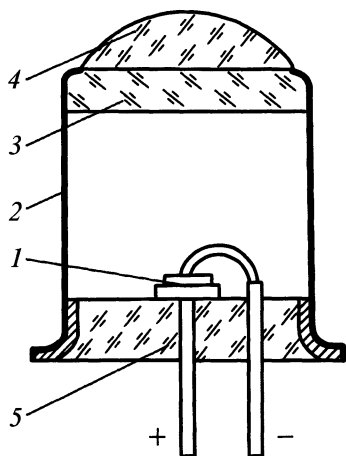


Рис. 2.4. Схема светоизлучающего диода:

- 1 – излучающий элемент на p - n -переходе;
 2 – металлический корпус; 3 – стекло;
 4 – линза; 5 – изолирующее основание

излучение (главным образом арсенид галлия с кремнием), в сочетании с антистоксовыми люминофорами, в результате чего удается получить красное, зеленое и голубое свечения.

Размеры контакта с p - n -переходом очень малы, обычно $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ см}^2$, столь же мала и область свечения. Это позволяет делать светоизлучающие диоды очень малых размеров. Свечение возникает на границе полупроводников и выходит наружу сквозь один из полупроводниковых материалов и через зазор между двумя материалами. Конструкция типичного светоизлучающего диода приведена на рис. 2.4. Габаритные размеры современных светоизлучающих диодов составляют $3 \dots 7 \text{ мм}$ в диаметре. Главные потери излучения в этих приборах связаны с полным внутренним отражением.

Светоизлучающие диоды работают от источника постоянного напряжения $1 \dots 3 \text{ В}$ при токах $10 \dots 100 \text{ мА}$, сила света порядка $0,01 \dots 0,02 \text{ кд}$. Световая отдача желто-зеленого светоизлучающего диода из фосфида галлия достигает нескольких сотен лм/Вт , но поток излучения очень невелик. Мощность ИК-излучения

составляет $5 \dots 7 \text{ мВт}$ на 100 мА . Обычно светоизлучающие диоды работают при плотностях тока в месте контакта порядка десятков А/см^2 . Если на светоизлучающий диод на основе GaAs дать короткие импульсы тока с плотностью порядка сотен А/см^2 , то он переходит в лазерный режим и генерирует короткие вспышки ИК-излучения с высоким КПД.

2.2.4. Источники света с радиоактивными изотопами

Источники света этого типа не требуют внешних источников питания, взрывобезопасны, имеют большой срок службы, но дают малые световые потоки и яркости, достаточные только для освещения шкал приборов, создания светящихся знаков и т.п.

Световые знаки с тритиевым наполнением представляют собой запаянную стеклянную колбу или трубку диаметром $1 \dots 3 \text{ см}$, покрытую изнутри слоем люминофора и наполненную тритиевым газом – изотопом водорода (^3H).

Испускаемое тритием β -излучение (электроны малой энергии $5,7 \text{ кВ}$) возбуждает люминофор, который излучает свет с характерным для него спектром. Стеклянные стенки колбы совершенно непроницаемы для трития и β -излучения, так что такой ИС не представляет радиационной опасности. У экспериментальных образцов яркость достигает $6 \dots 7 \text{ кд/м}^2$; обычно же она около $1 \dots 2 \text{ кд/м}^2$ для желтого, зеленого и белого цветов свечения и $0,3 \dots 0,8 \text{ кд/м}^2$ для синего и оранжево-красного. Яркость свечения падает по мере распада трития. Период полураспада трития – около 12 лет, фактически яркость снижается вдвое за $6 \dots 7$ лет, но полезный срок службы ламп можно считать равным $12 \dots 15$ годам.

Светосоставы постоянного действия представляют собой люминофор, смешанный с радиоактивными веществами. В настоящее время для возбуждения используют радиоактивные изотопы,

дающие только β излучение, – тритий или прометий-147. Их достоинство в том, что электроны полностью задерживаются даже тонкими защитными слоями вещества и не разрушают основу люминофора. Яркости в зависимости от цвета составляют $0,05 \dots 0,2$ кд/м². Светосоставы употребляются для изготовления самосветящихся красок. Они практически безвредны, так как тонкий слой лака полностью поглощает β -излучение трития. Спад яркости определяется периодом полураспада трития.

2.2.5. Лазерные источники излучения

По характеру генерации лазеры делят на импульсные и непрерывного излучения.

Импульсные лазеры излучают короткие импульсы света, индуцируемые излучением импульсного источника накачки (обычно газоразрядной лампы). Они могут работать в режиме свободной генерации, когда время перехода возбужденных атомов на нижний уровень не регулируется, и в режиме модулированной добротности, при котором с помощью специально быстродействующего затвора управляют степенью прозрачности одного из зеркал резонатора. В первом случае импульс состоит из ряда отдельных всплесков при общей длительности порядка $100 \dots 1000$ мкс.

В режиме модулированной добротности (моноимпульсном) лазер излучает очень короткий ($10 \dots 100$ нс) одиночный ("гигантский") импульс.

При этом резко возрастает мощность импульса. Например, лазер на рубине, в режиме свободной генерации излучает импульс с энергией $0,1$ Дж при длительности около 500 мкс. Мощность излучения при этом равна $2 \cdot 10^2$ Вт. В режиме модулированной добротности при длительности импульса 50 нс и той же энергии мощность равна $2 \cdot 10^6$ Вт.

По типу активного вещества лазеры делятся на твердотельные, полупроводниковые, газовые и жидкостные (рис. 2.5).

Излучение лазера характеризуется высокой направленностью, монохроматичностью, когерентностью, яркостью и поляризацией.

Направленность лазерного излучения обусловлена тем, что активная среда помещена в оптический резонатор, образованный двумя зеркалами. Фактически в таком резонаторе поддерживаются только волны, распространяющиеся вдоль направления, перпендикулярного плоскости зеркал. Из теории дифракции хорошо известно, что пучок пространственно-когерентного излучения с диаметром D_n характеризуется собственной дифракционной расходимостью θ , нижний предел для которой определяется выражением

$$\theta = \frac{k\lambda}{D_n},$$

где k – числовой коэффициент порядка единицы. Приведенное ограничение является принципиальным и преодолеть его невозможно никаким совершенствованием оптики. Пучок излучения с расходимостью, определяемой уравнением, называется дифракционно-ограниченным, такие пучки генерируются лазером при оптимальных условиях работы. Типичные значения углов расходимости, относящиеся к пучкам, выходящим непосредственно из резонатора, следующие:

Лазер	Угол расходимости, мрад
He- Ne	0,5 ... 3,0
Ar	0,5 ... 5,0
CO ₂	2,0 ... 10,0
Рубин	1,0 ... 20,0
Стекло с неодимом	0,5 ... 15,0
Алюмоиттриевый гранат с неодимом	2,0 ... 20,0
Арсенид галлия	20,0 ... 200,0

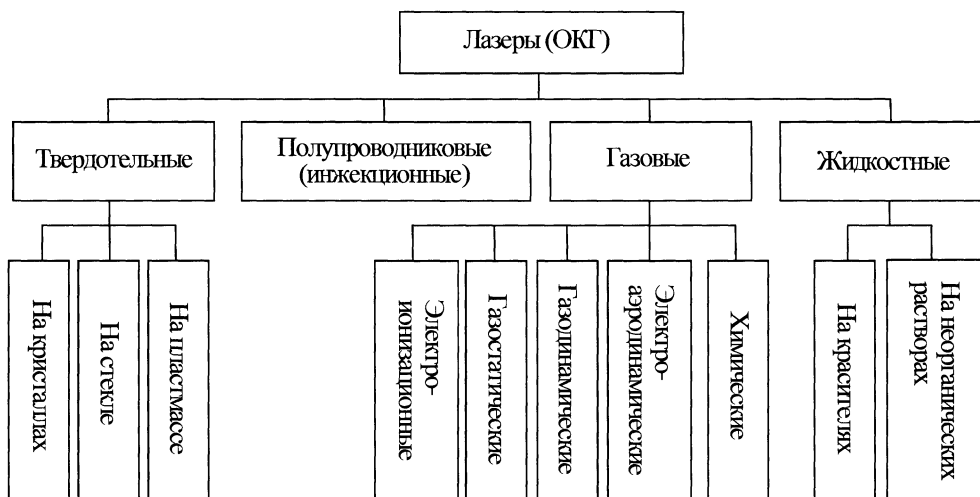


Рис. 2.5. Классификация лазеров

Путем коллимации, т.е. пропускания пучка через обращенный телескоп при введении света в окуляр телескопа, расходимость лазерного пучка может быть уменьшена пропорционально увеличению используемого телескопа.

Монохроматичность лазерного излучения объясняется главным образом следующими эффектами: во-первых, резонансным характером взаимодействия между активной средой и электромагнитным излучением и, во-вторых, наличием резонатора, который обеспечивает возникновение генерации только на собственных резонансных частотах. Ширина линии генерации для газовых лазеров, таких как He-Ne-лазер, составляет $\sim 100 \dots 1000$ МГц, при использовании специальных стабилизирующих устройств ширина линии может быть уменьшена до $1 \dots 10$ Гц. Для сравнения, уникальные узкополосные интерференционные фильтры в оптическом диапазоне имеют ширину полосы пропускания $10^{11} \dots 10^{12}$ Гц.

Под *когерентностью* понимают согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких волновых процессов. Соответственно различают пространственную и временную когерентность. Для определения пространственной

когерентности рассмотрим две точки P_1 и P_2 электромагнитной волны, которые в момент времени $t = 0$ принадлежат одному и тому же волновому фронту. Фазы электрических (или магнитных) полей в этих двух точках в момент $t = 0$ по определению одинаковы. Если значения фаз остаются равными и в моменты времени $t > 0$, обе точки волнового фронта называются когерентными. Если указанное условие выполняется для любой пары точек данного волнового фронта, говорят, что электромагнитная волна характеризуется полной пространственной когерентностью.

Для определения временной когерентности рассмотрим электрическое (или магнитное) поле волны в некоторой точке в моменты времени t и $t + \Delta t$. Если разность фаз остается постоянной для данного значения Δt при любых t , говорят, что волна имеет полную временную когерентность.

Под *яркостью* источника понимают мощность излучения, испускаемого с единичной площади в единичном телесном угле. Поскольку лазеры генерируют излучение с малой расходимостью, то даже маломощные лазеры обладают очень высокой яркостью. Что касается яркости мощных лазеров, то она на десять-две-

надцать порядков превосходит яркость лучших источников некогерентного излучения. Согласно одной из фундаментальных теорем оптики, яркость источника нельзя повысить с помощью оптической системы, поэтому лазеры незаменимы в тех случаях, когда необходимо создать высокую облученность объекта. Данные о яркости некоторых источников света приведены в таблице ниже.

Источник света	Яркость, Вт/см ² · ср
Лампа накаливания	0,1 ... 1
Дуговые лампы накачки лазеров	10 ² ... 10 ⁴
Солнце	130
He-Ne-лазер, непрерывный твердотельный лазер	10 ⁵ ... 10 ⁶
Твердотельный импульсный лазер с модуляцией добротности	10 ¹¹ ... 10 ¹²
Мощные лазеры на стекле для термоядерного синтеза	10 ¹⁷ ... 10 ¹⁸

2.3. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Принцип их действия основан на внешнем фотоэффекте (вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.) или внутреннем фотоэффекте (фотоэлементы, фотодиоды, фототранзисторы). В тепловых приемниках (калориметры, радиационные термоэлементы, болометры) энергия излучения преобразуется в тепловую, а последняя – в сигнал измерительной информации: изменение ЭДС, сопротивления, емкости и т.д.

Приемники излучения по характеру регистрации его пространственного распределения подразделяют на интеграль-

ные (фотодиоды, болометры и т.п.) и дифференциальные, или многоэлементные (фотопластинка, ПЗС-матрицы и т.п.).

2.3.1. Интегральные приемники излучения

Основные характеристики. Чувствительность приемника определяется отношением величины, характеризующей его реакцию (ток, напряжение), к величине, вызывающей эту реакцию (поток излучения, световой поток). Функциональную зависимость между этими величинами называют световой характеристикой. Динамический диапазон измерительных приемников обычно определяется пределами линейности световой характеристики. Чувствительность приемника к потоку монохроматического излучения называют *спектральной чувствительностью* $S(\lambda)$. Зависимость спектральной чувствительности от длины волны или другой спектральной координаты называется *спектральной характеристикой*. Во многих случаях удобно знать относительную спектральную характеристику (рис. 2.6) – кривую отношения чувствительности на данной длине волны к чувствительности на некоторой определенной длине волны (обычно к максимальной чувствительности).

Чувствительность приемника к некогерентному потоку излучения называют *интегральной*. Интегральную чувствительность к световому потоку называют *световой чувствительностью*. Интегральная чувствительность излучения определяется выражением

$$S_e = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda},$$

где $\Phi_{e\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения.

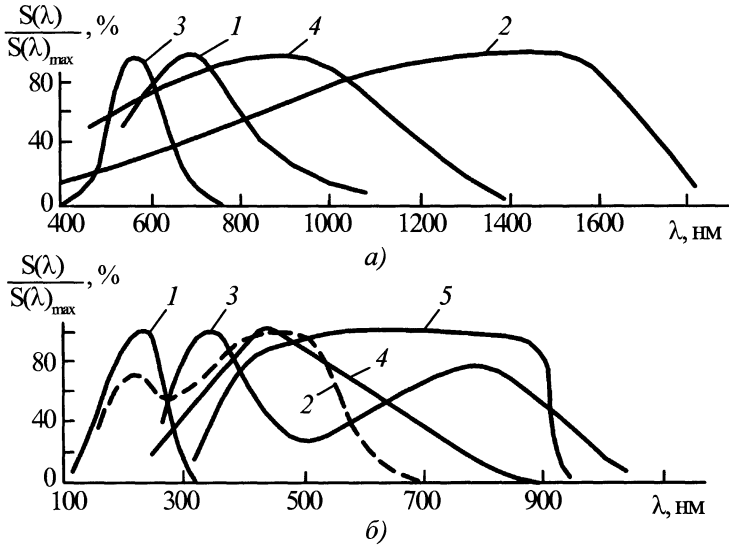


Рис. 2.6. Относительные спектральные характеристики:

а – приемники с внутренним фотоэффектом: 1 – кремниевый фотодиод; 2 – германиевый фотодиод; 3 – селеновый фотоэлемент; 4 – сернисто-серебряный фотоэлемент;

б – электровакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители с различными фотокатодами и материалами входных окон: 1 – теллуристо-рубидиевый с окном из фтористого магния; 2 – сурьмяно-цезиевый с окном из кварца; 3 – кислородно-серебряно-цезиевый с окном из стекла; 4 – мультищелочный с окном из стекла; 5 – арсенид-галлиевый с окном из стекла

В выражении для интегральной чувствительности учитывается характеристика эффективности действия приемника, в частности для световой чувствительности она определяется относительной спектральной световой эффективностью монохроматического излучения $V(\lambda)$ и максимальной спектральной световой эффективностью монохроматического излучения для дневного зрения $K_{\lambda, \max} = 683 \text{ лм/Вт}$.

Интегральная чувствительность нормируется для определенного источника (обычно это источник А). Изменение температуры окружающей среды вызывает изменение интегральной чувствительности и искажение формы кривых спектральной чувствительности фотоэлектрических приемников.

Темновой ток – ток, протекающий на выходе фотоприемника при отсутствии ОИ на входе. Минимальное его значение,

которое можно обнаружить, характеризуется порогом чувствительности приемника. Его принято оценивать потоком излучения или световым потоком, создающим на выходе приемника сигнал, эквивалентный сигналу от шумов приемника. Обусловленный шумами сигнал пропорционален корню квадратному из полосы пропускания всей измерительной схемы. Поэтому порог чувствительности (световой эквивалент шума) определяют в $\text{Вт/Гц}^{1/2}$ или $\text{лм/Гц}^{1/2}$.

Временное разрешение фотоприемников определяют полной длительностью импульсной характеристики или длительностью ее фронта, которая является реакцией приемника на воздействие единичного δ -импульса (т.е. импульса, длительность которого намного меньше длительности реакции приемника). Временное разрешение определяется также временем

нарастания переходной характеристики – реакции фотоприемника на единичный скачок (ступенчатый импульс).

Фотоэлектрические электровакуумные и полупроводниковые приемники излучения – приборы, в которых под воздействием поглощенного ОИ генерируется электрический ток (фототок) и ЭДС (фотоЭДС). Их действие основывается на фотоэлектронной эмиссии в вакууме (электровакуумный фотоэлемент, фотоэлектронный умножитель) или на внутреннем фотоэффекте (полупроводниковые фотоэлементы, фотодиоды и фототранзисторы).

Электровакуумные фотоэлементы – это приборы с двумя электродами (фотокатод и анод), помещенными в вакуумированную стеклянную или металлоглазную колбу с оптическим окном.

Для измерения параметров коротких импульсов излучения ($10^{-9} \dots 10^{-10}$ с) фотоэлементы выполняются в виде отрезка коаксиальной линии. Волновые сопротивления фотоэлемента и кабеля должны быть согласованы, что можно осуществить коническим трансформатором с переменным по длине волновым сопротивлением.

Шумы фотоэлементов обусловлены статической природой излучения и фотоэлектронной эмиссии и тепловыми шумами на нагрузочном сопротивлении. При использовании нагрузочных сопротивлений более 10^{10} Ом тепловые шумы настолько возрастают, что целесообразнее становится применить вместо фотоэлементов фотоэлектронные умножители.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – электровакуумный прибор, в котором ток фотоэлектронной эмиссии фотокатода усиливается умножительной (динодной) системой посредством вторичной эмиссии. Для ускорения и фокусировки электронов между фотокатодом, фокусирующими электродами катодной камеры, направляющими их на вход динодной системы, первыми и последующими динодами (электродами, умножающими

падающий на них электронный поток посредством вторичной эмиссии) и анодом создаются разности потенциалов при помощи внешнего высоковольтного источника (600 ... 3000 В) и делителя напряжения (рис. 2.7). Типы фотокатодов те же, что у электровакуумных фотоэлементов.

Умножительная система ФЭУ может состоять из ряда дискретных динодов (работающих на отражение или прострел), непрерывного динода с распределенным сопротивлением в виде одного канала (канальные ФЭУ) или совокупности множества каналов – микроканальных пластин. При подаче на концы канала высокого напряжения вдоль него создается электростатическое поле, ускоряющее вторичные электроны, многократно соударяющиеся со стенкой канала, усиливая ток. Усиление фототока может также осуществляться за счет эффекта усиления при бомбардировке *p-n*-перехода электронами больших энергий (гибридные ФЭУ). Серийно выпускаются только ФЭУ с дискретной динодной системой. Дискретные динодные системы отличаются материалом динодов (сплавы Cu-Be, Al-Mg, Cu-Al-Mg или напыленные слои $SbCs_3$ на подложке из Ni и др.), расположением (в линию, по кругу), формой (корытообразные, коробчатые, жалюзийные) и методом фокусировки (электростатическая, магнитная, в скрещенных электрических и магнитных полях).

Анодный блок ФЭУ обычно состоит из последующего динода и анода коллектора электронов. В быстродействующих ФЭУ применяются дополнительные электроды для рассасывания объемного заряда и фокусировки электронов на коллектор.

Основные параметры ФЭУ: спектральная и световая чувствительности ($1 \dots 10^4$ А/лм), равные соответствующей чувствительности катода, умноженной на коэффициент усиления, умножительной системы ($10^3 \dots 10^8$); порог чувствительности – световой эквивалент шума темного анодного тока ($10^{-12} \dots 10^{-14}$ лм/Гц $^{1/2}$); временное разрешение (2 ... 20 нс).

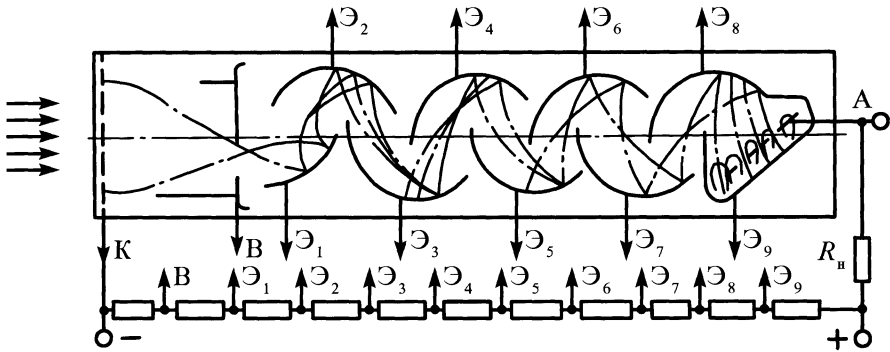


Рис. 2.7. Схема включений ФЭУ (линейная диодная система с корытообразными диодами):

К – фотокатод; В – фокусирующие электроды входной системы; Э₁–Э₉ – диоды; А – анод; R_н – сопротивление нагрузки; - · - · - · - траектории электронов

Фотоэлектронные полупроводниковые приемники излучения (полупроводниковые фотоэлементы и фотодиоды) – полупроводниковые приборы с электронно-дырочным переходом (*p-n*-переход), действие которого основано на фотогальваническом эффекте. Поглощение ОИ в таких приборах приводит к увеличению числа свободных носителей внутри полупроводника. Под действием электрического поля перехода (запирающий слой) носители заряда пространственно разделяются (электроны накапливаются в *n*-области, дырки – в *p*-области), и между слоями возникает фотоЭДС. При замыкании внешней цепи через нагрузку протекает электрический ток.

Существует много видов полупроводниковых (фотогальванических) фотоэлементов и фотодиодов: селеновые, сернисто-серебряные, кремниевые, германиевые и др. В фотометрии распространение получили селеновые фотоэлементы, спектральная характеристика которых легко приводится к $V(\lambda)$ (светофильтрами марок ЖЗС-18 толщиной 2,1 мм и ЗС-8 толщиной 1,9 мм), и кремниевые фотоэлементы, отличающиеся высокой стабильностью чувствительности. Интегральная чувствительность селеновых фотоэлементов –

около 500 мкА/лм (или 200 мкА/лм с указанными фильтрами), кремниевых – более 3000 мкА/лм. Световая характеристика полупроводниковых фотоэлементов линейна лишь при сопротивлении нагрузки, малых по сравнению с их внутренним сопротивлением. Максимальная рабочая частота селеновых фотоэлементов составляет 50 ... 100 Гц.

Фотодиодами называют полупроводниковые фотоэлементы, используемые преимущественно в диодном режиме, т.е. с внешним источником питания. Схемы включения фотоэлементов и фотодиодов приведены на рис. 2.8.

Прибор, аналогичный фотодиоду, но обладающий еще свойством усиления фототока (на втором *p-n*-переходе), называется фототранзистором. Диапазон линейности в фотодиодном режиме для германиевых фотодиодов простирается до десятков тысяч люкс, у кремниевых – до сотен тысяч люкс. В вентильном режиме отклонение от линейности световой характеристики наступает при меньших освещенностях.

Радиационный термоэлемент – термопреобразователь, действие которого основано на использовании зависимости термоЭДС термопары от температуры.

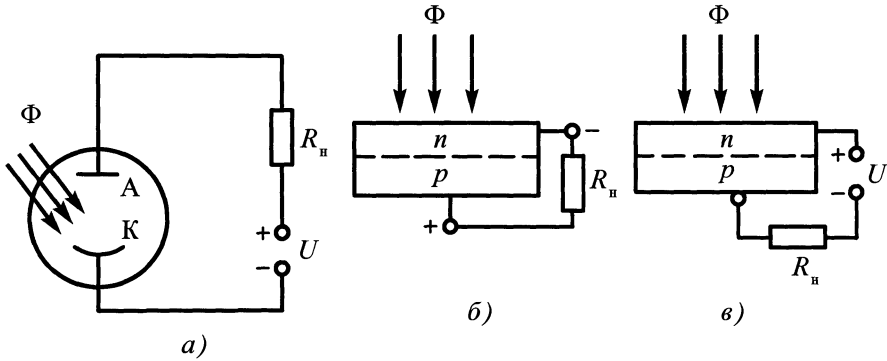


Рис. 2.8. Схемы включения фотоприемников:

a – электровакуумный фотоэлемент; *б* – вентильный фотоэлемент; *в* – фотодиод; А – анод; К – фотокатод; Φ – поток излучения; R_n – сопротивление нагрузки; U – рабочее напряжение

Спай пленочной или проволочной термопары нагревается непосредственно падающим ОИ или в результате теплопроводности от примыкающего к спаю элемента, воспринимающего ОИ. Для лучшего поглощения ОИ поверхность нагреваемого спаю или элемента, воспринимающего ОИ, должна быть зачернена. Материалами термопары служат металлы, сплавы и полупроводники, обеспечивающие наибольшую термоЭДС (висмут и сурьма, висмут и теллур и др.). Для получения пористой черной поверхности облучаемого спаю используют электролитически осажденную платину, наносимую распылением золотую чернь, сурьмяную чернь и др. Для увеличения чувствительности необходимо уменьшать теплоемкость термоэлементов и отвод теплоты от них. Это достигается изготовлением термоэлементов из особо тонких проволочек или пленок и их помещением в вакуумную колбу. Окно колбы должно быть из материала, прозрачного для измеряемого излучения (кварц, сапфир, стекло, LiF_2 и др.).

Несколько термоэлементов, расположенных рядом и соединенных между собой, называют *термостолбиком*, в нем суммируются термоЭДС отдельных элементов. Для компенсации влияния колебаний температуры окружающей среды

применяют термоэлемент, состоящий из двух одинаковых термопар, включаемых навстречу друг другу, – компенсированный термоэлемент. Излучением нагревается только один из спаев, но температура окружающей среды действует на оба, а поскольку они включены навстречу, это влияние компенсируется. Чувствительность элементов достигает $20 \dots 35 \text{ В/Вт}$, порог чувствительности $5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Они могут работать на частотах до 10 Гц.

Калориметр – термоэлектрический приемник переменной температуры, по принципу действия аналогичный радиационному термоэлементу, но отличающийся большим размером приемного элемента, не объединенного с чувствительным элементом. Калориметры градуируют с помощью электрической мощности или энергии по методу замещения. Они отличаются значительно большей инерционностью, чем термоэлементы. Приемным элементом калориметра может служить плоская медная пластина или полый медный конус со встроенным электрическим нагревателем, на приемную поверхность которого наносится поглощающее покрытие. Чувствительным элементом калориметра является термобатарея, содержащая более 200 термопар, равномерно распределенных между наружной поверхностью

приемного элемента и поверхностью пассивной теплоемкой оболочки. С помощью калориметров измеряют мощность и энергию мощных непрерывных и импульсных ОИ.

Принцип действия *болометра* – термопреобразователя сопротивления – основан на зависимости его сопротивления от температуры. Чувствительным элементом болометра является зачерненная металлическая или полупроводниковая проволока или пленка. Для увеличения чувствительности болометра, так же как и в термоэлементе, уменьшают его теплоемкость, для уменьшения теплоотвода его помещают в вакуумированную колбу. Преимущество болометров – меньшая, чем у термоэлементов, инерционность, но порог чувствительности у них больше (10^{-9} Вт/Гц^{1/2}).

Фотоприемники для регистрации лазерного излучения. Приемники излучения (ПИ) для лазеров должны отвечать таким требованиям, как высокая энергетическая чувствительность, линейность преобразования сигнала в широком динамическом диапазоне (до 100 ... 120 дБ), согласованность спектральной характеристики с длиной волны излучения лазера, малая инерционность (10^{-6} ... 10^{-8} с), равномерность чувствительности по приемной площадке, слабая зависимость чувствительности от температуры, достаточно большой угол приема излучения (для сканеров, работающих без фокусирующей оптики в приемном канале), временная стабильность характеристик.

В ультрафиолетовом (УФ), видимом (ВИ) и ближнем инфракрасном диапазоне (ИК) спектра, т.е. в диапазоне длин волн 1,3 мкм, этим требованиям в наибольшей степени отвечают фотодиоды (ФД) и фотоумножители (ФЭУ). В среднем ИК-диапазоне спектра ($\lambda = 1,3 \dots 5,6$ мкм) используют обычно охлаждаемые жидким азотом ПИ на основе сурьмянистого индия (JnSb) или пироэлектрические ПИ (ППИ). В диапазоне длин волн 15 мкм находят применение охлаждаемые жидким азотом

фотоспротивления на основе тройных соединений КРТ (кадмий-ртуть-теллур) или пироэлектрические приемники излучения.

Для специальных измерений (лазерная сканирующая дальнометрия и виброметрия и т.п.) находят применение позиционно-чувствительные ПИ.

Существует два метода приема лазерного излучения – прямое фотодетектирование и фотогетеродинамирование. Первый основан на непосредственной регистрации светового потока квадратичным детектором (ФЭУ, ФД и т.д.). Информация о фазе излучения при этом теряется. При фотогетеродинамном приеме на приемник излучения направляются одновременно информационный лучистый поток и излучение лазерного гетеродина, которые пространственно сфазированы с высокой точностью (порядка нескольких угловых секунд). Возникающие при этом биения оптических сигналов регистрируются фотодетектором и на его выходе с помощью электронного фильтра выделяется сигнал промежуточной частоты. Лазерные гетеродины обеспечивают чувствительность, близкую к теоретическому пределу, обеспечивают эффективную пространственную фильтрацию сигнала. Однако необходимость прецизионного пространственного совмещения оптических каналов сигнала и гетеродина, поддержания стабильности частоты гетеродина с высокой точностью ограничивают применение фотогетеродина метода. В основном он используется в системах дальней связи и обнаружения объектов при работе с лазером на углекислом газе ($\lambda = 10,6$ мкм).

2.3.2. Дифференциальные приемники излучения

Для регистрации пространственного распределения параметров оптических полей объектов применяют анализаторы изображения (АИ) различных типов.

Они делятся на две большие группы – сканирующие и несканирующие.

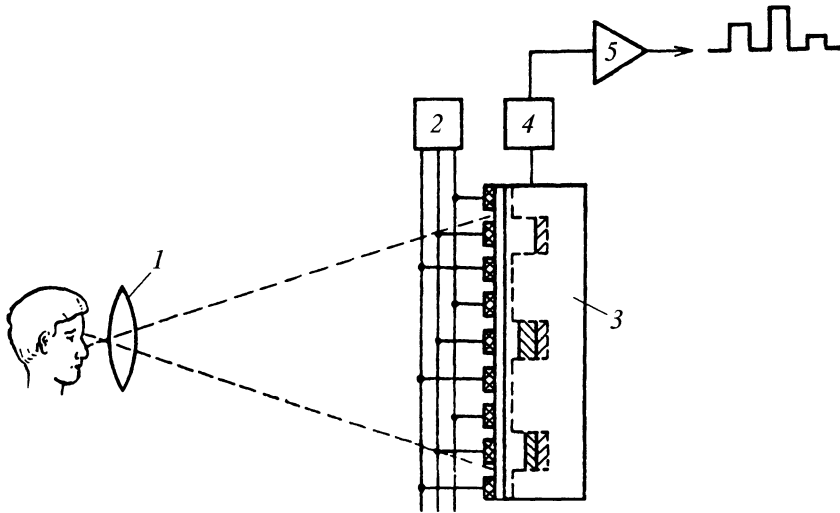


Рис. 2.9. Схема восприятия образа с помощью ФПЗС:

1 – оптическая система; 2 – схема управления; 3 – ФПЗС; 4 – выходное устройство; 5 – видеоусилитель

К несканирующим АИ относятся электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и усилители яркости изображения (УЯИ), фотопленки и фотопластинки (ФП), фотохромные преобразователи (ФХП), эвапорографы (ЭП), визуальные голографические системы и т.п.

Сканирующие АИ можно разделить на две группы – активные и пассивные. Пассивные основаны на последовательном просмотре поверхности объектов системой, состоящей из оптико-механического или иного сканатора и узкоканального фотоприемника. Объект при этом освещается широкоугольным источником света или регистрируется его собственное излучение (тепловое, люминесцентное и др.). Изображение в пассивных АИ может производиться также многоэлементным фотоприемником (матрица ПЗС, видикон и т.п.), т.е. с помощью телевизионной системы с электронным сканированием изображения.

В активных АИ объект контроля точка за точкой освещается сфокусированным пучком оптического излучения, а регистрация отраженного и/или прошед-

шего через объект излучения производится с помощью оптико-электронной системы, обычно на базе одноэлементного фотоприемника.

Разновидностью активных АИ являются системы, основанные на освещении объекта контроля световыми импульсами, синхронизированными с различными фазами движения объекта, что позволяет визуализировать его изображение в этих фазах за счет стробоскопического эффекта.

Разновидностью многоэлементных приемников излучения являются квадрантные (многоплощадочные) позиционно-чувствительные приемники, широко применяемые в системах контроля геометрии изделий, лазерных центраторах, навигационных системах роботов и т.д.

Наиболее распространены в системах ОНК матричные приемники на базе приборов с зарядовой связью (ПЗС).

ЭОП, УЯИ, телевизионные трубки вакуумного типа (видикон, диссектор и т.д.) находят ограниченное применение в ОНК.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС). Фоточувстви-

тельный прибор с зарядовой связью представляет собой специфическую фоточувствительную МДП-микросхему с регулярной системой электродов, расположенных на поверхности диэлектрика.

Электроды располагаются в виде линейки (строки) или матрицы. Типичные размеры электрода: длина $L = 5$ мкм, ширина $Z = 40$ мкм, зазоры между ними $l_3 < 1 \dots 2$ мкм, число электродов обычно $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ в линейном и $10^4 \dots 10^6$ в матричном ФПЗС. Электроды изготавливают из алюминия или (для увеличения прозрачности) из поликремния. Строки матричного ФПЗС отделяются узкими областями стоп-канальной диффузии.

Функционально ФПЗС – это прибор, воспринимающий изображение, осуществляющий его разложение на элементарные фрагменты, поэлементное электронное считывание (сканирование) и формирование на выходе видеосигнала, адекватного изображению.

В ФПЗС пространственное распределение интенсивности излучения преобразуется в рельеф электрических зарядов, локализующихся в приповерхностной области. Зарядовые пакеты перемещаются от элемента к элементу, выводятся наружу и дают последовательность видеоимпульсов, адекватную полю излучения, т.е. осуществляется стандартный телевизионный алгоритм восприятия образа (рис 2.9).

К числу основных параметров и характеристик ФПЗС (в скобках приведены типичные значения) относятся:

- амплитуды $U_{\text{хр(сч)}}$ (10 ... 30 В) и фронты $t_{\text{ф}}$ (10 ... 100 нс) управляющих трапецеидальных импульсов;
- относительные потери при единичном акте передачи ϵ ($10^{-3} \dots 10^{-5}$);
- максимальная тактовая частота (1 ... 5 МГц для поверхностных и 10 ... 50 МГц для объемных ФПЗС);
- максимальная поверхностная плотность зарядового пакета $Q_{\text{п max}}$ при насыщении потенциальной ямы или соответст-

вующая ему экспозиция насыщения $H_{\text{e max}}$ (50 нКл/см² и 300 нДж/см²);

- минимальная плотность зарядового пакета $Q_{\text{п min}}$, различимая на фоне шумов, или соответствующая ему пороговая экспозиция $H_{\text{e min}}$ (50 нКл/см² и 0,3 нДж/см²);

- динамический диапазон $D = 20 \lg (H_{\text{e max}} / H_{\text{e min}})$ (60 дБ);

- плотность темнового тока J_{T} (5 ... 20 нА/см²), относящаяся к числу технологических параметров;

- чувствительность и спектральный диапазон (для кремниевых ФПЗС $S_{\text{ф}} = 0,1 \dots 0,4$ А/Вт, $\Delta\lambda$ охватывает больший или меньший участок в интервале 0,4 ... 1,1 мкм);

- частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), определяющая разрешающую способность r (10 ... 50 лин/мм).

Размер матриц современных ПЗС находится в диапазоне от 6×6 мм² (1/4") до $25,4 \times 25,4$ мм² (1"). Число пикселей в матрицах достигает $12 \cdot 10^6$.

Различают монохромные и цветные ПЗС-матрицы. В последних на поверхность фоточувствительных элементов нанесены микро-, светофильтры, выделяющие красные, синие и зеленые области спектра, соответствующие областям спектральной чувствительности цветочувствительных элементов глаза человека.

Монохромные камеры отличаются повышенной световой чувствительностью, достигающей 10^{-4} лк.

2.4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОНК

Оптические системы осветителей в ОНК. Обобщенная структурная схема источника ОИ изображена на рис. 2.10. Излучение источника излучения 2, питаемого от блока питания, проходит блоки спектральной фильтрации 3, поляризаторы 4, аттенуатор 5, модулятор 6, а затем оптической системой 7 фокусируется на объект. Излучение источника света контролируется блоком 9. Блок 10 (ПЭВМ или микропроцессор) управляет элементами источника.

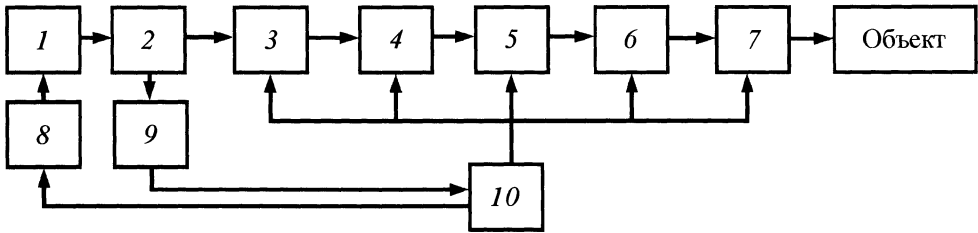


Рис. 2.10. Структурная схема источника оптического излучения:

- 1 – источник питания; 2 – источник излучения; 3 – блок спектральной фильтрации;
 4 – блок поляризационных фильтров; 5 – блок оптических аттенуаторов; 6 – блок модуляции;
 7 – оптическая система фокусировки, сканирования и управления размерами и формой светового пучка; 8 – контроллер блока питания; 9 – блок опорного фотоприемника;
 10 – блок управления

В реальных приборах некоторые блоки могут отсутствовать, что определяется спецификой конкретной задачи контроля. В то же время функции некоторых блоков могут быть объединены в одном. Например, использование в оптической системе устройства отклонения луча (дефлектора), построенного на основе зеркала с интерференционным покрытием и обладающего селективным отражением, позволяет соединить функции спектральной фильтрации и сканирования излучения; применение в качестве оптической системы голограммы позволяет соединить в этом элементе функции фокусировки, преобразования формы и сканирования пучка света.

На рис. 2.11 изображена типовая оптическая схема источника облучения. Излучение источника 2 зеркальным эллиптическим отражателем фокусируется на входной торец волоконно-оптического световода 3. Выходной торец этого световода расположен в фокусе конденсорной линзы 4 и после преломления в ней обеспечивает оптимальный режим работы (в параллельных лучах света) светофильтра 5, поляроида 6 и оптического затвора или модулятора 7. Вторая конденсорная линза 8 проектирует изображение источника света во входной зрачок объектива 10, что обеспечивает режим освещения объекта, аналогичный применяемому в стандарт-

ных слайд-проекторах. Размером и формой транспорта 9 с переменной прозрачностью управляют с помощью диафрагмы поля зрения 14. Апертурная диафрагма 11 объектива 10 позволяет плавно ослаблять интенсивность пучка света. Зеркало дефлектора 12 перемещает изображение транспаранта 9 по поверхности объекта 13 по любому заданному закону.

Данная схема позволяет реализовать любые режимы облучения – точечный, площадочный, линейчатый.

В качестве дефлектора можно использовать системы другого типа, например, акустооптические, голографические и т.п. Транспарант можно выполнить на базе жидкокристаллического матричного экрана с электронным управлением для формирования на объекте пятна любой сложной формы с высокой равномерностью в зоне нагрева. Возможна организация внутрикадрового сканирования с помощью транспаранта 9.

В качестве источника света можно использовать лампы накаливания, мощный светодиод, лазер, газоразрядный источник и т.д. Затвор (модулятор 7) может быть как оптико-механическим (шторный или центральный затвор, обтюратор и т.п.), так и любого другого типа (электро-, магнито-, акустооптического и т.п.).

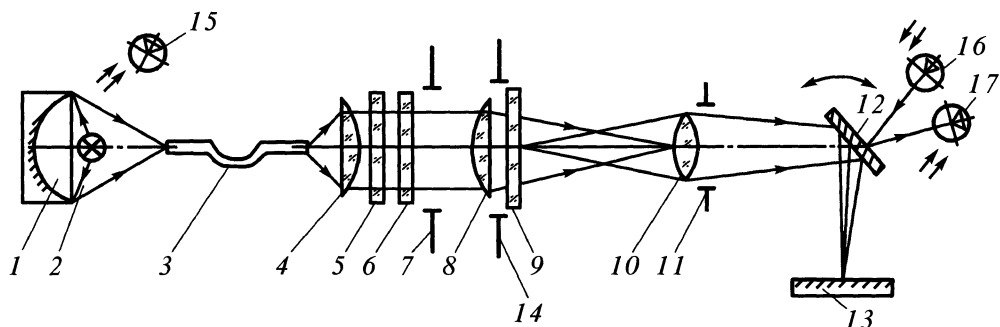


Рис. 2.11. Обобщенная оптическая схема источников облучения для ОНК:

1 – эллипсоидный отражатель; 2 – источник света; 3 – световод; 4, 8 – линзы; 5 – светофильтр; 6 – поляризатор; 7 – модулятор; 9 – транспарант; 10 – объектив; 11 – апертурная диафрагма; 12 – зеркальный дефлектор; 13 – объект; 14 – диафрагма поля зрения; 15 – опорный фотодиод; 16 – светодиод; 17 – фотодиод оптрона

Фотодиод 15 предназначен для контроля светового потока источника 2. Оptron на базе светодиодов 16 и 17 используется для генерации синхросигналов в системе контроля пространственного положения зеркала дефлектора. Световод 3 транспортирует излучение по любой сложной пространственной траектории и существенно облегчает компоновку системы контроля.

Большинство реальных источников лучистой энергии с высокой мощностью имеют значительные габариты, требуют воздушного или водяного охлаждения, силовых кабелей питания и т.д. При длине трассы примерно 1 ... 3 м целесообразно использовать многожильные световоды с большой апертурой ($A \geq 0,5$) диаметром 1 ... 6 мм. При длине трассы до 10 ... 20 м необходимо применять одножильные оптические кабели с диаметром световедущей жилы 0,1 ... 0,4 мм, обладающие малой апертурой ($A = 0,1 \dots 0,3$) и эффективно работающие с направленными источниками излучения (например, лазер). Использование таких кабелей с обычными источниками света (например, галогенными лампами), размер тела канала которых составляет 3 ... 10 мм, затруднено, так как требует сложных систем фокусировки

излучения. Многожильные световоды пропускают излучения мощностью 1 ... 3 Вт. Кварцевые моносветоводы передают излучение мощностью до 50 ... 100 Вт. Для транспортировки инфракрасного излучения мощных лазеров на CO ($\lambda = 5 \text{ мкм}$) и CO₂ ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$) применяют инфракрасные моносветоводы на основе халькогенидных или фторидных стекол.

Излучение концентрируется на объекте с помощью оптической системы (линзовой, зеркальной или зеркально-линзовой). Линзовые системы находят ограниченное применение из-за трудностей коррекции хроматической аберрации в широком спектральном диапазоне, больших потерь на поглощение, сложности изготовления и эксплуатации материалов. Зеркальные системы свободны от хроматических аберраций, легко изготавливаются из дешевых и прочных заготовок, стекол обычных марок. Наиболее распространены системы со сферическими поверхностями из-за простоты изготовления, однако они обладают большой сферической аберрацией. Свободны от сферической аберрации параболические зеркала, однако они сложны в изготовлении и обладают большой комой (т.е. ошибкой, вызывающей искажения изображения то-

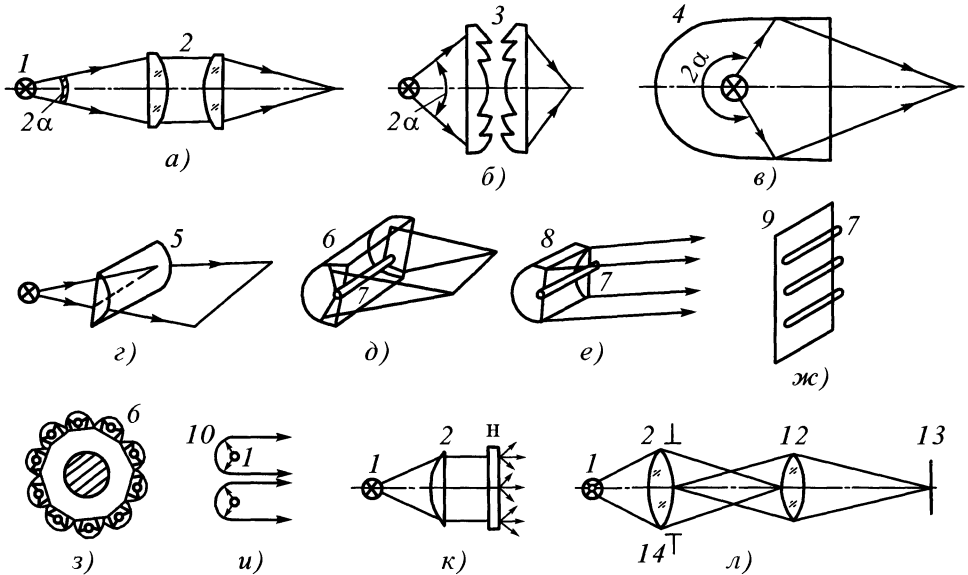


Рис. 2.12. Оптические системы с ГЛН:

а – линзовый конденсор; *б* – конденсор на основе линз Френеля; *в* – эллиптический отражатель; *г* – цилиндрическая линза; *д* – цилиндроэллиптический рефлектор; *е* – параболоцилиндрический рефлектор; *ж* – мозаичный осветитель из линейчатых источников; *з* – мозаичный осветитель на основе точечных источников; *и* – нагреватель на основе композиции из параболоцилиндрических рефлекторов; *к* – осветитель с рассеивателем; *л* – осветитель по схеме Келлера (*1* – точечный источник света; *2* – линза; *3* – линза Френеля; *4* – эллипсоидный рефлектор; *5* – цилиндрическая линза; *6* – цилиндроэллиптический рефлектор; *7* – линейчатый источник света; *8* – параболоцилиндрический рефлектор; *9* – плоский рефлектор; *10* – параболоидный рефлектор; *11* – рассеиватель; *12* – объектив; *13* – объект; *14* – транспарант (маска)

ченного объекта при отличных от нуля углах поля зрения). Применяются однокомпонентные системы, обладающие высокой лучевой прочностью и наименьшими потерями на поглощение, технологичные в изготовлении. Для точной фокусировки используют двухзеркальные объективы типа Кассегрена, двухлинзовые или трехлинзовые системы, а также комбинированные зеркально-линзовые системы. В качестве рефракционных элементов оптических систем применяют кристаллические германий и кремний (прозрачны до $\lambda = 20$ мкм), оптические материалы типа халькогенидных стекол и др. Особенно удобны материалы, прозрачные в видимой области, например, фтористый барий

(прозрачен до $\lambda = 10$ мкм). К перспективным материалам относятся бескислородные инфракрасные стекла, а также оптические керамики, получаемые горячим прессованием из мелкокристаллических порошков халькогенидов или фторидов. Оптические керамики имеют мелкокристаллическую структуру, обладают высокой лучевой прочностью, хорошо пропускают излучение с длиной волны до $8 \dots 12$ мкм. На их основе изготавливают и световоды, с помощью которых излучение подводится к труднодоступным объектам.

Оптические системы существенно улучшают характеристики излучателей – равномерность, степень концентрации излучения, КПД, спектральные характери-

стики (для селективных оптических элементов).

Для фокусировки излучения в малой зоне нагрева применяют линзовые конденсоры (рис. 2.12, *а*, *б*) или эллиптические отражатели (рис. 2.12, *в*). Наибольшим углом сбора излучения обладают эллипсоидные линзы ($2\alpha \leq 320^\circ$). Для линз Френеля $2\alpha \leq 100^\circ$, а для обычных линз – $2\alpha \leq 80^\circ$. Увеличение конденсоров может изменяться в диапазоне $\beta = 0,1 \dots 10^x$ в зависимости от конструкции и назначения излучателя. Для фокусировки точечных излучателей в линию применяют цилиндрические линзы (рис. 2.12, *з*), для фокусировки на объект линейчатых излучателей – цилиндроэллиптические отражатели (рис. 2.12, *д*). Для облучения объектов значительной площади можно использовать параболоцилиндрические рефлекторы (рис. 2.12, *е*) с линейчатым источником в фокусе параболоида. При облучении протяженных изделий с размерами, значительно превышающими размеры выходной апертуры облучателя, применяют растровые (мозаичные) системы из линейных (рис. 2.12, *жс*) или точечных (рис. 2.12, *з*) источников. При заданном шаге раstra (расстояние между лампами) и размеры отражательных плоских панелей облучателя подбираются исходя из требований к равномерности облучения, экономичности и т.д. Для выравнивания облученности в зоне нагрева применяют растровые линзовые системы и различные рассеиватели, в том числе профилированные, изготавливаемые из стекла или оргстекла методом штамповки или моллирования (рис. 2.12, *к*).

Для контроля труб применяют схемы с облучателями (параболоцилиндрическими в случае линейных ламп), радиально располагаемыми вокруг объекта.

На рис. 2.12, *л* показана схема облучения объектов по схеме Келлера с помощью двухкомпонентного конденсатора. Она характеризуется высокой однородно-

стью освещения изделия и возможностью проецировать на него световое поле любой формы с помощью транспаранта (маски), устанавливаемого в плоскости первого компонента.

Выбор материала и качество поверхности обработки рефлектора существенно влияют на его светотехнические параметры. Наибольшим коэффициентом отражения обладают чистые металлы, особенно в ИК-области спектра.

Структурные схемы и схемотехнические особенности построения осветителей с лазерами. Обобщенная структурная схема лазерного осветителя показана на рис. 2.13. Она включает блок излучателя (*I*), приемник излучения (*II*), блоки визуального контроля (*III*), управления объектом (*IV*) и обработки и отображения информации (*V*).

Блок излучателя включает обычно лазер, коллиматор ОК для уменьшения расходимости излучения, модулятор (*M*), поляризационный; элемент (*P*), дефлектор (*D*), объектив (O_1), светоделитель (*СД*) для отклонения части излучения на фотодиод ФД опорного канала прибора.

Блок приемника излучения включает объектив (O_2), светофильтр (*Ф*) для спектральной селекции лазерного излучения на фоне оптических помех, поляриод (*A*) для анализа состояния поляризации отраженного от объекта света, фотодиод (*ФД*) или ФЭУ, усилитель (*У*), АЦП, графическое оперативное запоминающее устройство (*ЗУ*).

Блок визуального контроля содержит осветитель (*ОС*), оптический визир (*СВ*) с измерительной сеткой (*ИС*), зеркало (*З*).

Блок управления объектом состоит из устройства перемещения объекта в прямоугольной системе координат, его вращения и наклона, а также устройства функционального воздействия на изделие, необходимого для более эффективного выявления дефектов (нагрев, вибрация, воздействие электромагнитным полем и т.д.).

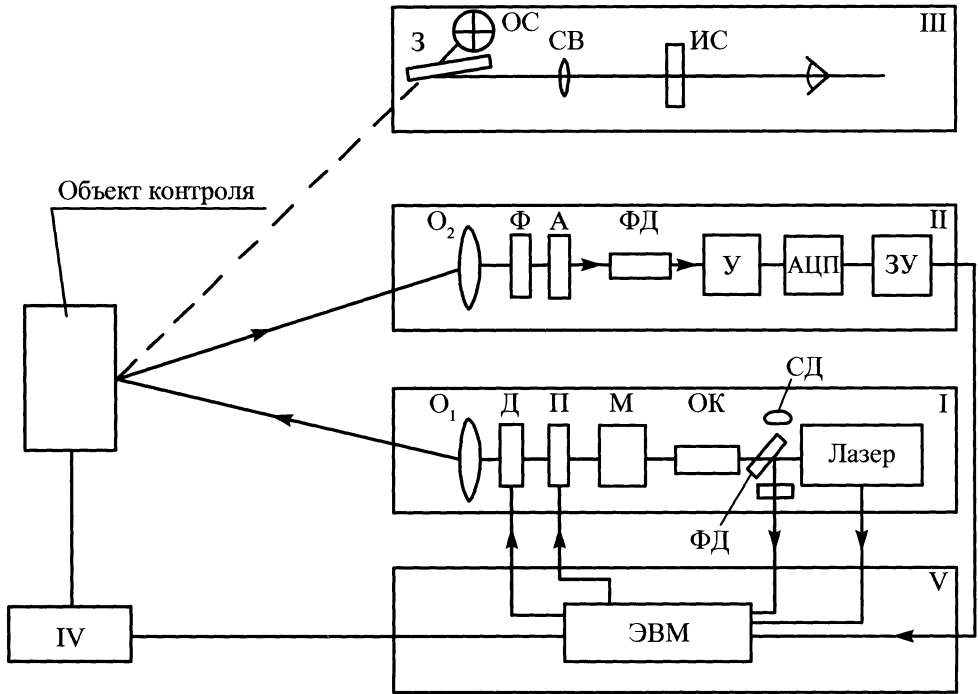


Рис. 2.13. Обобщенная структурная схема лазерного осветителя

Синхронизацию информационных потоков и управляющих воздействий, а также обработку и индикацию результатов контроля осуществляет персональная ЭВМ (или микропроцессор, если объем вычислений невелик).

Понятно, что в зависимости от характера решаемых задач данная схема может изменяться.

Рассмотрим основные варианты компоновки структурных схем для конкретных задач контроля.

В зависимости от взаимного расположения излучателя, объекта и приемника излучения могут быть реализованы схемы контроля с односторонним или двусторонним контролем.

В зависимости от геометрии освещения и приема излучения от объекта различают схемы контроля в светлом или темном поле, т.е. с совмещенными или раздельными оптическими системами источника и приемника.

По характеру способов развертки и характеристик направленности источника (1) и приемника (2) излучения возможны следующие варианты компоновки схем: с узкопольным излучателем и широкоугольным приемником (рис. 2.14, в), с узкоугольным источником и приемником излучения (рис. 2.14, б), с широкоугольным излучателем и узкопольным приемником (рис. 2.14, а).

Для анализа пространственного распределения (индикатрисы) рассеяния света объектом применяют схему с несколькими приемниками излучения, расположенными либо в одной плоскости, либо в различных меридиональных плоскостях, проходящих через объект.

В ряде случаев (например, при контроле физических характеристик методом лазерного зондирования) применяют схему несинхронного сканирования. Скани-

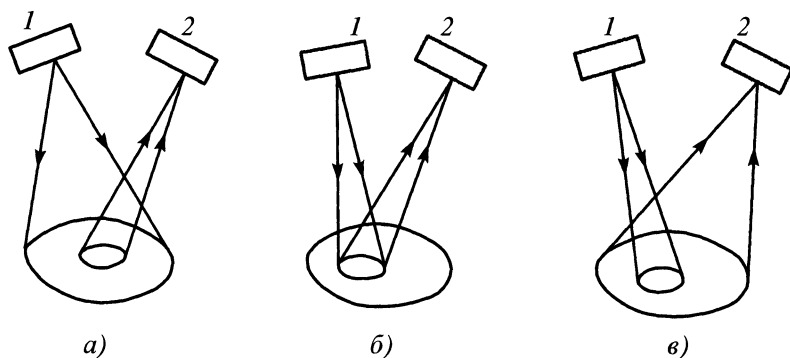


Рис. 2.14. Варианты компоновки схем:

1 – излучатель; 2 – приемники

рование объекта одновременно двумя узкими несовмещенными пучками позволяет получать стереоизображение, а также осуществлять двумерное оптическое дифференцирование изображения.

Схема с широкоугольным приемником может быть реализована по варианту интегрального фотометра со светомерным шаром или эллипсоидом, что позволяет обеспечить эффективный сбор рассеянного объектом света (конечно, при этом теряется информация об индикатрисе отражения).

Устройства преобразования геометрических параметров лазерных пучков. Для расширения лазерных пучков и изменения их расходимости применяются зеркальные, линзовые и зеркально-линзовые телескопические системы. Система Галилея с отрицательным окуляром предпочтительна для мощных лазеров, так как в фокусе положительного окуляра при мощностях порядка нескольких десятков ватт может возникнуть пробой воздуха ("лазерная искра"). Зеркальные системы свободны от хроматических aberrаций, работают в широком диапазоне спектра, однако к качеству их покрытий предъявляются высокие требования. Наиболее эффективны интерференционные диэлектрические зеркала, коэффициент отражения которых доходит до 99,99 %. Для лин-

зовых систем в видимом диапазоне спектра применяются обычные марки оптических стекол. В УФ-диапазоне используется кварц. Для ИК-диапазона применяют кристаллы типа германия и кремния, просветленные для соответствующих длин волн, а также некоторые типы стекол и оптических керамик. Увеличение телескопических систем и пропорциональное им уменьшение расходимости пучка определяется по формуле

$$\beta = f_2 / f_1 = D / d = \alpha / \alpha_0,$$

где f_1 и f_2 – соответственно фокусные расстояния объектива и окуляра телескопа; D и d , α_0 и α – соответственно диаметры и угловая расходимость пучка лазера до и после телескопа (рис. 2.15).

Для фокусировки лазерного излучения применяют одиночные линзы или зеркала, а также стандартные микрообъективы. Одиночные элементы (особенно асферические, с хорошей коррекцией aberrаций) предпочтительнее, так как они дают меньше вредных бликов в оптической системе. Кроме того, они устойчивее при работе с мощным оптическим излучением. Перспективно (особенно для фокусировки пучков малого диаметра с $\varnothing 1 \dots 5$ мм) использование градиентных световодов (градианов, или селфонов), т.е. оптических элементов с неоднородным распределени-

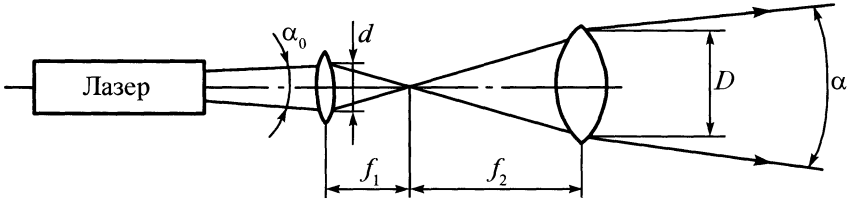


Рис. 2.15. Схема расширения лазерного пучка

ем показателя преломления (обычно оно симметрично и имеет параболический характер). Входные торцы графанов при этом плоские, что облегчает их юстировку.

Получают распространение голографические оптические элементы (ГОЭ), киноформы, зонные пластинки, рассчитываемые на ЭВМ и изготавливаемые методами фотолитографии на плоских подложках. Подобные элементы незаменимы в ИК-области спектра, где выбор материалов ограничен. Распределение энергии в фокусе ГОЭ может быть практически любым.

Диаметр фокального пятна можно определить по приближенной формуле $d \approx \alpha f$, где α – угол расходимости излучения (рад), f – фокусное расстояние линзы или объектива. Например, для гелий-неонового лазера при $\alpha = 3' \approx 0,001$, $f = 100$ мм получим $d = 100 \cdot 0,001 = 0,1$ мм, а при $f = 10$ мм $d = 0,01$ мм. Формула справедлива для одномодовых лазеров с гауссовским распределением интенсивности в поперечном сечении пучка.

Глубину резкости линзы, фокусирующей лазерный пучок, можно оценить по формуле $h = 3,6\lambda(f/r_0)^2\sqrt{\varepsilon_\Phi}$, где λ – длина волны лазера, f – фокусное расстояние линзы, r_0 – радиус гауссова пучка на входе линзы, ε_Φ – допустимое относительное расширение фокального пятна, т.е. $\varepsilon_\Phi = d/d_0$, где d и d_0 – соответственно диаметры перетяжки в центре и на периферии зоны фокусировки.

Увеличения глубины резкости можно добиться с помощью аксикона, т.е. линзы с увеличенной сферической aberrацией.

Для увеличения расходимости лазерных пучков (например, при освещении большой поверхности расходящимся пучком) применяют отрицательные линзы диффузора из матового стекла.

Для формирования на поверхности изделия световых пятен с анизотропной структурой (полоски, кольца) используют цилиндрические или торические линзы или зеркала.

Для диссекции (разделения) пучка лазера на несколько лучей применяют обычно светоделительные зеркала.

Удвоения лучей с сохранением их параллельности можно добиться также с помощью двупреломляющего кристалла (кальцита, например). При этом лучи имеют ортогональные поляризации. Эффективным светоделителем может быть дифракционная решетка.

Для транспортировки лазерного луча по сложной траектории, в том числе в труднодоступные полости, применяют перископы или световоды. Напомним, что на выходе световода увеличивают расходимость луча, что требует установки на его выходном торце градана или обычной линзы.

В настоящее время лучшие серийные газовые лазеры стабилизируются по интенсивности с точностью порядка $3 \dots 10\%$. Нестабильность частоты для одночастотных лазеров может быть доведена до 10^{-10} .

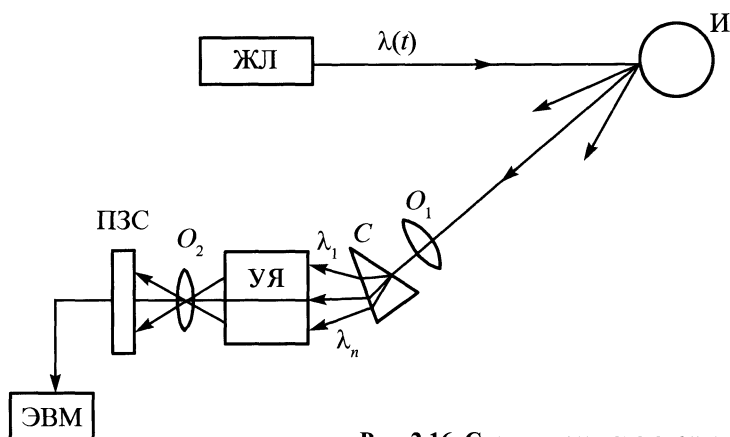


Рис. 2.16. Схема лазерного спектроанализатора

Устройства для спектральной селекции и изменения частоты лазерного излучения. Для спектральной селекции излучения лазеров широко применяют интерференционные, реже – абсорбционные светофильтры. Первые отличаются узкой полосой пропускания (0,1 нм), зависящей от угла падения луча. Стеклопленочные абсорбционные фильтры лишены этого недостатка, но имеют существенно более широкую полосу пропускания. В качестве селектирующего элемента могут использоваться также дифракционные решетки и монохроматоры различных типов.

Перестройка частоты лазерного излучения осуществляется за счет различных физических эффектов. Некоторые лазеры, например, газовые (аргоновый, гелий-неоновый) генерируют на разных частотах при изменении параметров резонатора, поэтому их частоту можно дискретно изменять, подбирая соответствующие параметры резонатора. Например, гелий-неоновый лазер ЛГ-126 может излучать на длинах волн 0,63; 1,15 и 3,39 мкм, последовательно переключаемых сменой зеркала резонатора. Для перестройки аргонового лазера в узких пределах (0,48 ... 0,53 мкм) используют монохроматор или встроенный дисперсионный элемент. Некоторые лазеры на парах металла одновременно излучают на ряде

частот. Например, три линии, расположенные в видимой области спектра (красную, зеленую, синюю), что за счет смешения цветов делает их излучение белым при визуальном наблюдении. Эти лазеры перспективны для контроля цветовых характеристик объектов, цветных лазерных дисплеев.

Твердотельные полупроводниковые лазеры могут в небольших пределах перестраивать частоту излучения при изменении температуры или тока накачки.

Особенно широким диапазоном перестройки частоты обладают жидкостные лазеры (ЖЛ), однако они требуют сложных систем накачки. Комбинация ЖЛ с параметрически перестраиваемыми твердотельными лазерами позволяет создавать высокоэффективные быстродействующие системы дистанционного спектрального зондирования, например с помощью видеолидаров.

ЖЛ облучает изделие *И*, отраженный (мультиспектральный) сигнал направляется объективом O_1 в спектрограф *С* и разлагается в спектр, изображение которого усиливается усилителем яркости *УЯ* и объективом O_2 (или волоконным диссектором) переносится в плоскость многоэлементного анализатора (линейка ПЗС и т.п.) и обрабатывается ЭВМ. Если объект сканируется, то на экране дисплея визуа-

лизируются все изменения спектра отражения его поверхности за время контроля (рис. 2.16).

Устройства для изменения и анализа поляризационных характеристик излучения лазера. Для изменения и анализа поляризации излучения лазера применяют поляризаторы различных типов, преимущественно кристаллические (призмы Николя, Глана, Фуко, Томпсона и др.), и компенсаторы, широко применяемые в оптике (Сенармиона, Берека и др.).

Они работают в широком спектральном диапазоне видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра, мало влияют на расходимость и интенсивность пучков лазера. В среднем и дальнем ИК-диапазонах применяют поляризаторы в виде решеток из тонкой проволоки, некоторые полимерные материалы, отражательные поляроиды (стопа пластинок из диэлектрического материала).

Для деполяризации излучения лазера используют эффекты его рассеяния на некоторых материалах. Хорошими деполяризаторами служат волоконно-оптические элементы (ВОЭ), однако они сильно изменяют расходимость пучка.

Анализ поляризации излучения производится с помощью описанных выше элементов. В последнее время созданы высокочувствительные магнитооптические поляриметры, а также многочисленные эллипсометры, эффективно применяемые в полупроводниковой промышленности.

С помощью анализа поляризованного света исследуют напряженное состояние двулучепреломляющих прозрачных сред методом фотоупругости. Перспективно, например, применение для дефектоскопии материалов квантовой электроники – сочетание метода лазерной калориметрии (т.е. измерения поглощения материала по его нагреву при прохождении мощного излучения) и фотостимулированной фотоупругости.

В ряде случаев, например, при изменении зеркального отражения объекта при нормальном падении на него луча лазера, необходимо подавить блики, отраженные от оптических элементов сканера в сторону приемника излучения. Для этого применяют систему поляризационной оптической развязки.

Она позволяет разделить лазерные сигналы, распространяющиеся по одному оптическому тракту, но в противоположных направлениях, и служит для разделения информационного и бликового сигналов. Лазерное излучение, поляризованное линейно в вертикальной плоскости, падает на оптическую пластину под углом Брюстера θ . При этом практически нет потерь на отражение от ее поверхностей. После прохождения четвертьволновой пластинки излучение приобретает круговую поляризацию. Отраженный сигнал, также поляризованный по кругу, проходя через пластинку в обратном направлении, приобретает линейную поляризацию в горизонтальной плоскости и почти полностью отражается от нее. Эффективность развязки возрастает с увеличением показателя преломления пластины.

Для оптической развязки можно использовать и эффект Фарадея, т.е. вращение плоскости поляризации света при воздействии мощного магнитного поля на некоторые вещества (например, антимоид индия). При двукратном прохождении света (туда и обратно) через такой элемент направление его поляризации не возвращается к первоначальному, а поворачивается на удвоенный угол. Однако для работы, например, с антимоидом индия (прозрачным для лазеров с $\lambda = 10,6$ мкм) нужны очень сильные поля (до 70 ... 100 кГс), что требует применения сверхпроводящих электромагнитов.

Устройства модуляции лазерного излучения. Для низкочастотной модуляции ($f \approx 10$ кГц) применяют механические вибраторы, обтюраторы, затворы и другие

устройства, а также фото- и электрохромные ячейки.

Для высокочастотной модуляции обычно применяют электрооптические модуляторы, в частности, работающие на продольном эффекте Поккельса, а также магнитооптические и акустооптические модуляторы на твердых (ниобат лития) или жидких (вода и др.) средах. Их рабочие частоты достигают 10 ... 100 МГц. Для сверхвысокочастотной модуляции применяют элементы интегральной оптики.

Формирование импульсного излучения многих лазеров осуществляется по цепи питания.

Для получения сверхкоротких импульсов (пико- и фемто-секундных) применяют специальные оптоэлектронные системы.

Устройства сканирования лазерного излучения. Одним из основных элементов систем сканирования является дефлектор, т.е. устройство перемещения луча в пространстве. Сканирование объектов сфокусированным световым лучом в сочетании с синхронной фотоэлектрической регистрацией рассеянного ими света позволяет преобразовывать двумерные поля яркости в одномерный электрический сигнал, который затем визуализируется на экране телевизионного дисплея или анализируется с помощью ЭВМ.

Неоднородности оптических свойств объекта вызывают адекватную модуляцию интенсивности сигнала фотодетектора. При этом могут быть реализованы режимы анализа поверхности объекта, практически неосуществимые традиционными, например, телевизионными методами. В частности, становится возможным наблюдение объектов в режиме темного поля под сверхмалыми углами, анализ фотоэлектрических свойств полупроводников методами светового зондирования и др.

Сканирование широко применялось и до изобретения лазера, однако такие ограничения традиционных источников света

(лампы накаливания, газоразрядные источники, светодиоды) как сравнительно невысокая яркость и обусловленная этим необходимость работы при больших апертурах фокусирующей оптики, характеризующихся малой глубиной резкости изображения, делали системы "бегущего луча" недостаточно эффективными. Лазеры с их высокой направленностью и яркостью стимулировали разработку этих устройств.

Необходимыми элементами сканеров являются лазеры, оптические системы фокусировки и преобразования параметров лазерного луча, дефлекторы, индикаторы положения луча и фотодетекторы с системой обработки сигналов.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные типы дефлекторов. Классификацию дефлекторов обычно проводят по физическим принципам, положенным в основу их действия, на следующие группы:

1. Системы с механическим сканированием объекта относительно неподвижного лазерного луча. Эти системы применяют обычно для контроля изделий сложной формы или в случае, когда необходимо в каждой точке объекта регистрировать пространственное распределение (индикатрису) рассеяния света. Они обладают высокой информативностью при распознавании типов дефлекторов (трещины, царапины, раковины, локальные изменения шероховатости и т.д.) по их "оптическим образам".

Альтернативой метода механического (в том числе трехмерного) сканирования объекта относительно неподвижного луча может служить применение роботов или манипуляторов, в подвижных органах которых располагаются лазерные источники и фотодетекторы (при этом часто используют световоды для транспортировки излучения от лазера к роботу).

Траектории механического сканирования могут быть самыми различными – крестообразными, растровыми, векторными

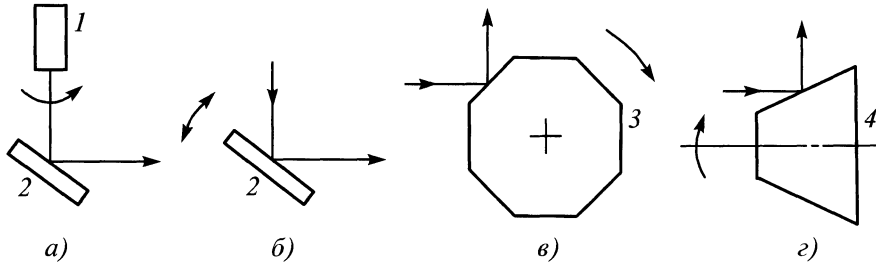


Рис. 2.17. Схемы зеркальных дефлекторов:

а – вращающееся зеркало; *б* – колеблющееся зеркало; *в* – вращающаяся зеркальная призма; *г* – вращающаяся зеркальная пирамида: 1 – лазер; 2 – зеркало; 3 – призма; 4 – пирамида

ми (т.е. с перемещением объекта по заданному контуру в пределах локальных участков), спиральными, винтовыми (характерны для контроля поверхностей труб, цилиндров) и т.д.

Для перемещения объектов обычно используют шаговые (в том числе линейные) двигатели, управляемые ЭВМ. Скорости перемещений достигают 100 ... 200 мм/с (для объектов типа печатных плат). Применение воздушной или магнитной подвески позволяет добиться полей перемещения до 500 мм и более при точности позиционирования до 0,005 мм.

Среди достоинств систем с механическим сканированием – высокие фотометрическая точность и разрешающая способность (до 1 мкм). Используются они для контроля как макро-, так и микрообъектов.

Основной недостаток механических сканеров – невысокая производительность контроля.

2. Системы с комбинированным оптико-механическим сканированием. Для них характерно перемещение объекта по одной координате механическим путем при сканировании его по второй координате бегущим световым лучом.

Этот тип сканеров – один из наиболее распространенных в промышленности. Например, так сканируется поверхность листового проката, текстильных материа-

лов, полимерных пленок, бумажных рулонов и пр.

Развертка луча при этом производится обычно по линейной траектории в направлении, перпендикулярном к движению объекта. При контроле внутренней поверхности труб применяют круговую развертку лучом в сочетании с продольным перемещением самой трубы. Возможны и другие комбинации.

3. Сканеры с оптической разверткой поверхности объектов с помощью дефлекторов, реализующих "обегание" лучом неподвижного изделия. Эти системы находят применение в основном в лазерной микроскопии. Эти системы – наиболее скоростные.

По принципу действия оптические дефлекторы обычно делят на оптико-механические и электронно-оптические. Кроме того, иногда выделяют в отдельные группы системы светоклапанного типа, т.е. оптико-механические или электронно-оптические устройства, осуществляющие сканирование широкого пучка лазера подвижным прозрачным элементом (метод "бегущей диафрагмы", или "бегущего изображения"). Наконец, внутри каждой группы можно разделить дефлекторы по физическим методам управления.

Оптические дефлекторы. Их действие основано на изменении направления луча в пространстве при его отражении

(или преломлении в случае рефракционных сканеров) от подвижных оптических элементов (вращающихся или колеблющихся зеркалах, линзах, призмах, пирамидах и т.д.).

Наиболее распространены *зеркальные дефлекторы*, которые имеют широкий спектральный диапазон (ахроматичность), высокие скорости развертки, относительно просты в изготовлении. На рис. 2.17 показаны схемы основных типов зеркальных дефлекторов.

Наиболее просты в изготовлении одиночные вращающиеся и колеблющиеся зеркала. Зеркальные пирамиды (барабаны) и призмы обеспечивают высокие скорости развертки, но требуют высокой точности изготовления, тщательной динамической балансировки.

Для вращения этих дефлекторов применяют синхронные двигатели с системой стабилизации частоты вращения. Схема, изображенная на рис. 2.17, б, обычно реализуется с помощью гальванометрической магнитоэлектрической системы. Ее применяют в высокоточных системах развертки лучей небольшого диаметра с невысокой частотой развертки (1 ... 10 кГц), например, в лазерной микроскопии, при углах развертки 10 ... 12°.

Дефлекторы рефракционного (преломляющего) типа применяются сравнительно редко, что обусловлено сложностью их изготовления.

К перспективной группе относятся голографические дефлекторы, работа которых основана на способности голограммы, действующей подобно дифракционной решетке с переменной частотой штрихов, отклонять проходящий через нее луч при вращении. Достоинством голографических дефлекторов является их способность объединять свойства фокусирующих и отклоняющих оптических элементов. Голограммы для дефлекторов обычно рассчитывают на ЭВМ и изготавливают методом фотолитографии, в том числе на термостойких материалах. Их

легко тиражировать. Современные голографические дефлекторы с водяным охлаждением выдерживают излучение мощностью в сотни ватт.

Действие *биморфных дефлекторов* основано на способности пластинок из двух пьезокерамических материалов изгибаться под действием приложенного электрического поля. Они отличаются высоким быстродействием, но ограниченным углом сканирования ($2\alpha \approx 10^\circ$) и небольшими размерами зеркал.

Применяются также и *волоконно-оптические дефлекторы* (ВОД), способные преобразовать круговую траекторию сканирования в линейную (или иную) и имеющие высокую скважность, практически равную 1. Однако на выходе ВОД луч лазера расходится, что затрудняет их применение. ВОД обычно используют для сканирования объектов, расположенных вблизи от их выходных торцов. На входе ВОД сканирование осуществляют дополнительным дефлектором (например зеркальным).

В лазерных системах нагрева применяют также *акустооптические* (АОД), *электрооптические* (ЭОД) и *магнитооптические* (МОД) дефлекторы. В АОД используется эффект дифракции лазерного луча на градиентах показателя преломления в жидкостях или твердых телах, в которых возбуждаются звуковые волны. Ультразвуковая волна, распространяясь в твердом теле или жидкости, создает локальные сжатия и разрежения среды. Наличие эффекта фотоупругости и механических напряжений обуславливает изменения диэлектрической проницаемости и, следовательно, показателя преломления среды. В среде периодически образуются слои с отличающимися показателями преломления. Они движутся со скоростью звуковой волны и следуют друг за другом на расстоянии половины длины звуковой волны. При прохождении света через такую структуру возникает дифракция.

Серийные АОД работают на длине волны лазерного излучения $\lambda = 0,63$ мкм, имеют порядка 1000 точек сканирования, диапазон рабочих частот Δf от 300 МГц и время переключения $t \approx 5,1$ мкс. Такие АОД изготавливают из некоторых марок стекол (тяжелые флинты), молибдата свинца, плавленного кварца, германия.

Действие ЭОД основано на эффекте изменения показателя преломления некоторых веществ в электрическом поле, что соответствующим образом изменяет угол выхода луча из выходной грани кристалла дефлектора.

Работа МОД основана на возможности отклонения лучей с помощью тонких магнитных пленок или пластин, в которых создается доменная структура типа дифракционной решетки, период и ориентация которой изменяются с помощью эффекта Фарадея (вращение плоскости поляризации в магнитном поле).

Светоклапанные дефлекторы (СКД) или управляемые транспаранты применяют в системах нагрева, когда высокое пространственное разрежение необходимо сочетать с предельным быстродействием, свойственным системам с электронной разверткой. Лазерный кинескоп – один из наиболее перспективных дефлекторов. Экран его выполнен из специального полупроводникового материала, который при возбуждении электронным лучом излучает когерентный свет, подобно полупроводниковому лазеру. Изменением интенсивности электронного пучка можно добиться перестройки яркости и частоты излучения. Размер электронного луча – порядка 20 ... 40 мкм, что позволяет при использовании мокрообъективов получать диаметр светового зонда в плоскости примерно 1 ... 2 мкм. Быстродействие – до 50 кадр/с и более при формате раstra до 1024×1024 элементов.

Системы с электронной разверткой строятся также по классическим схемам светоклапанных систем.

Важным элементом любого дефлектора являются датчики положения луча. Наибольшую точность имеют дефлекторы, в которых с помощью схемы расщепления лучей (например полупрозрачные пластинки) один из лучей синхронно с основным сканирует специальную оптическую шкалу. При механическом сканировании объекта синхроимпульсы формируются с помощью раstra, жестко скрепленного с устройством перемещения объекта. В менее точных системах иногда достаточно зафиксировать начало строки (или кадра) с помощью фотодатчика, запускающего счетчик со стабилизированным кварцевым генератором. В этом случае координата луча определяется подсчетом количества импульсов этого генератора. Скорость развертки при этом должна быть постоянной. Подобный принцип приводит к ошибке, связанной с угловыми искажениями положения луча после объектива. Коррекция достигается применением объективов с дисторсией, рассчитанной так, чтобы эти искажения компенсировались. В особо точных сканерах, особенно, гальванометрического типа и при увеличенных размерах зеркал (20 ... 100 мм), фактическое положение зеркала контролируется специальным угловым интерферометром.

2.5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.5.1. Алгоритмы предварительной обработки изображений

Обработка изображений в оптическом НК производится с целью распознавания объектов или измерения их количественных характеристик. В соответствии с этим алгоритмы обработки информации принято делить на алгоритмы предварительной обработки и алгоритмы распознавания или измерения, что носит в известной степени условный характер, так как в

некоторых практических приложениях одни и те же по математической сути алгоритмы могут быть использованы на обоих этапах рассматриваемого процесса.

В соответствии со спектральным диапазоном преобразователей свет-сигнал и принципом действия оптической системы контроля датчик формирует изображение объекта. Под изображением понимается двумерная картина поля интенсивности. Формально получение изображения заключается в определении функциональной зависимости интенсивности излучений рабочей зоны от координат точек изображения x и y :

$$I = f(x, y).$$

В дальнейшем под "изображением" будем понимать именно функциональную зависимость $f(x, y)$. С учетом принятой терминологии задачей предварительной обработки является поиск каких-либо особенностей функции $f(x, y)$, которые могли бы указать на тип объекта, находящегося в рабочей зоне.

Дискретизация изображения. Первый шаг предварительной обработки изображения состоит в квантовании исходного изображения $f(x, y)$. Квантование ведется как в пространстве по координатам x и y , так и по значению функции изображения $f(x, y)$.

Результатом квантования в пространстве, или как иногда говорят, по полю изображения, является дискретное изображение – функция $g(m, n)$, значения которой совпадают со значениями $f(x, y)$ в точках:

$$x = x_0 + \Delta x m; \quad y = y_0 + \Delta y n,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$; $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

На каждом этапе формирования изображений вносятся аппаратные помехи (шумы), искажающие функцию $f(x, y)$ по пространственным признакам.

Методы фильтрации шумов. Для компенсации шумов в изображении ус-

пешно применяется *пороговый метод*, при котором последовательно проверяется цифровое представление яркости всех элементов изображения $f(x, y)$, и если яркость элемента F_{ij} анализируемой группы из $N \times N$ элементов превышает среднюю яркость группы на заданное пороговое значение η , то его яркость заменяется на среднюю яркость группы G . Здесь N обычно принимается равным 3, 5 или 7.

Поскольку шум пространственно не коррелирован, его спектр содержит более высокие пространственные частоты, чем спектр изображения. В связи с этим широкое распространение получили методы сглаживания шумов, основанные на низкочастотной пространственной фильтрации, например, методы анизотропной и рекуррентной фильтрации.

Анизотропная фильтрация основана на свертке исходного массива изображения F размером $M \times M$ со сглаживающим массивом размером $N \times N$. При $N \ll M$ реализуется программное сканирование изображения F массивом N и операция свертки на каждом шаге. В результате формируется новый массив B сглаженного изображения, имеющий размер $M \times M$. Такой алгоритм удобен для реализации на ЭВМ. Для каждого элемента a_{ij} исходного массива F выполняется преобразование, которое заключается в перемножении обрамляющей его матрицы заданного размера $N \times N$ с элементами W_{kl} сглаживающей матрицы. Последующее суммирование произведений дает элементы выходного массива.

Качество фильтрации повышается с увеличением N , однако пропорционально N^2 растет время обработки исходного изображения на ЭВМ. Массив W должен быть нормирован для получения единичного коэффициента передачи, чтобы при фильтрации не изменялась средняя яркость изображения. Могут применяться сглаживающие массивы W следующего

вида:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Рекуррентная фильтрация более эффективна, чем анизотропная, и дает экономии объема памяти. При рекуррентной фильтрации используются не только элементы исходного, но и элементы уже сглаженного изображения.

В практике встречаются случаи, когда основной вклад в общую погрешность изображения вносит один элемент системы; тогда не применяют фильтрацию шумов всего изображения, а только компенсируют погрешности этого элемента. Примером может служить геометрический шум, свойственный твердотельным полупроводниковым приемникам – приборам с зарядовой связью и фотодиодным матрицам. Чтобы скомпенсировать погрешность любого элемента фотоприемника, целесообразно использовать двойное считывание каждого кадра – темновое и с изображением. Скорректированное изображение получается вычитанием сигналов каждого элемента, полученных при двух считываниях.

Интегральные и дифференциальные алгоритмы предварительной обработки дискретных изображений. К интегральным относят алгоритмы, основанные на определении некоторых суммарных свойств дискретных изображений, их глобальных особенностей. Большинство из них базируется на интегральных преобразованиях. Эти алгоритмы используют для предварительной обработки как многоградационных, так и бинарных изображений, причем в последнем случае они значительно упрощаются.

Дифференциальные алгоритмы основаны на следующей предпосылке. Считается, что такие характеристики, как границы плоских объектов и отверстий в них, ребра трехмерных объектов и т.п., соот-

ветствуют максимумам нормы градиента функции изображения $f(x, y)$. Поиск градиента связан с определением производных функции $f(x, y)$, поэтому данные алгоритмы называют дифференциальными. Приведенные далее способы приближенных вычислений нормы градиента дискретного изображения $g(m, n)$ отличаются друг от друга количеством значений дискретного изображения, используемых на каждом шаге вычислений. Границы плоских объектов, ребер трехмерных объектов и т.п. могут быть определены любыми известными методами поиска максимума функции (операторы Собеля, Робертса и др.).

2.5.2. Сегментация и морфометрический анализ изображений

Важной задачей оптической структурографии является определение по изображению основных показателей (концентрация, размеры, форма и другие параметры) различных объектов, составляющих, в общем случае, неоднородную структуру.

Процесс получения количественной оценки структуры изображения предполагает решение одной из основных проблем анализа сложных изображений – проблемы сегментации изображений, под которой понимается разбиение изображения на области по сходству свойств их точек. В случае автоматизации методов количественного анализа сегментацию необходимо рассматривать как основной начальный этап, заключающийся в построении формального описания изображения, качество выполнения которого во многом определяет успех решения задачи оценивания количественных характеристик объектов изображения.

Количественная оценка структуры изображения прежде всего предполагает вычисление геометрических параметров объектов: площади, периметра, ориентации главной оси и т.д.

Подход к решению описанной выше задачи включает в себя четыре основных этапа:

- 1) определение по исходному тоновому изображению диапазона яркостей исследуемых объектов для проведения сегментации по яркостному признаку;
- 2) выделение связанных областей;
- 3) построение контуров областей;
- 4) вычисление геометрических параметров объектов.

Определение яркостного диапазона. На этом этапе, в интерактивном режиме, проводится так называемый *фазовый анализ* изображения, в результате которого получается мультифазное изображение посредством выставления порогов на полутоновых характеристиках изображения. Таким образом, для каждого типа объектов определяется цифровой диапазон.

Выделение связанных областей. Используя результаты фазового анализа, выбирается один из полученных яркостных диапазонов. Далее, в автоматическом режиме, осуществляется выделение связанных областей, состоящих из пикселей, попадающих в соответствующий цифровой диапазон. Обозначим выбранный диапазон через $T = [T_0, T_1]$, где T_0 , T_1 – соответственно минимальное и максимальное значение яркости. После того как цифровой диапазон выбран, считаем, что все пиксели, попавшие в него, составляют исследуемые объекты. Все остальные пиксели образуют фон.

Алгоритм прослеживания границы. Прослеживание контура начинается с обнаруженной граничной пары – двух смежных разноцветных точек, лежащих в одной строке изображения. Текущую пару разноцветных смежных точек будем называть *следающей парой*. Для следающей пары задается направление от белой точки к черной. Процесс прослеживания состоит в последовательном перемещении одного конца следающей пары в новую точку, лежащую от пары слева. Это обеспечивает обход контуров таким образом, что белый

объект оказывается слева от границы, а черный фон – справа.

На каждом шаге прослеживания анализируется одна пробная точка, смежная с обеими точками пары, а затем эта точка замещает в следающей паре точку того же цвета, что и она сама.

Последовательное перемещение следающей пары позволяет выделить все граничные точки, соответствующие одному граничному контуру. Процесс прослеживания завершается, когда следающая пара вернется в исходное положение, т.е. то, с которого начинается прослеживание границы.

Алгоритмы выделения признаков изображений. На этапе предварительной обработки стремятся создать сжатое описание объекта в выбранной системе признаков, а затем проводится обработка полученного образа.

Выбор признаков осуществляется на основе анализа класса объектов, возможностей датчиков изображения по разрешению, требований к скорости обработки. Наиболее используемыми можно считать геометрические (топологические) признаки, к которым относятся площадь и периметр изображения, число отверстий, размеры вписанных и описанных относительно изображения фигур, число и расположение углов и т.п. В некоторых случаях наибольшее различие заключается в моментах инерции изображений заданного класса, тогда их выбирают в качестве признаков.

Геометрические признаки инвариантны относительно поворотов изображения в поле зрения. Инвариантность относительно масштаба изображения достигается нормированием по площади или периметру. Это важное положительное свойство сжатого описания изображений в системе геометрических признаков.

Наиболее просто вычисляется площадь изображения. Ее значение можно получить простым подсчетом числа элементов цифрового изображения при ска-

нировании кадра. Инвариантность этого признака относительно масштаба изображения достигается нормированием по значению квадрата периметра. Периметр изображения вычисляется после выделения границ. Следовательно, вычислению периметра предшествует определение краев и линий изображения, из которых затем нужно выделить граничные элементы. Наиболее просто это решается для бинарных цифровых изображений, когда граничные элементы выделяются на перепаде освещенности объекта и фона, т.е. на переходе от силуэта (единицы) к фону (нулю). В случае изображений с несколькими градациями яркости необходимо запоминать элементы контуров, которые выделяются на этом перепаде при любых значениях яркости изображения.

Разработанные в настоящее время программы SPECTR MET позволяют проводить полуавтоматический анализ изображений и решать следующие задачи:

1. Сглаживание шумов и коррекция яркости/контрастности. Эта функция позволяет улучшать визуальное качество изображения.

2. Фазовый анализ изображения. Эта функция позволяет с помощью пороговой сегментации по гистограмме значений яркости производить выделение различных яркостных фаз объекта. При этом каждой яркостной фазе соответствует определенный компонент исследуемого металлографического шлифа. Результатом проведения фазового анализа является мультифазное изображение и таблица, отображающая процентное содержание выделенных фаз. Одновременно строится гистограмма распределения значений яркости. При проведении фазового анализа можно также воспользоваться функцией вычитания фаз. С помощью этой функции можно на мультифазном изображении закрасить одну или более фаз черным цветом или восстановить их исходный вид.

3. Построение профиля яркости. В этом режиме возможно получение графика

распределения уровней яркости вдоль выделенного по двум точкам прямолинейного отрезка. Полезность выполняемых операций сводится не только к определению значений яркости в любой точке заданного отрезка, но и к визуализации формы сечения двумерного изображения в третьей координате.

4. Калибровка. С помощью этой функции можно задать масштаб изображения по метрическому тест-объекту или масштабной метке, что является необходимой операцией перед проведением различных измерений на изображении.

5. Измерение расстояния между любыми двумя точками изображения. Данная функция позволяет измерять расстояние между двумя любыми точками на изображении. Перед использованием этой функции необходимо откалибровать систему.

6. Определение размера зерна. Одним из аспектов количественной металлографии является определение размера зерна металла, который оказывает существенное влияние на механические свойства металла. Например, с ростом зерна резко снижается ударная вязкость и повышается порог хладноломкости; чем крупнее зерно, тем более сталь склонна к закалочным трещинам и деформациям и т.д. Размер зерна – это средняя величина случайных сечений зерен в плоскости металлографического шлифа. В данной функции программы реализован метод измерения длин хорд для определения величины зерна, рекомендуемый Государственным стандартом (ГОСТ 5639–82). Этот метод основан на измерении линейных размеров отрезков – хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разнородной структуре.

7. Морфологический анализ изображения. Позволяет выделять на изображении связные области и прослеживать контур объектов, что является необходимым этапом для проведения количественного анализа.

Одним из важных направлений количественной микроскопии является объемная реконструкция объекта исследования.

Объемная (трехмерная) реконструкция объекта основывается на методах сте-

реологии, целью которой является восстановление геометрии и пространственной структуры исследуемых трехмерных объектов по их двумерному (плоскому) изображению.

СРЕДСТВА ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МИКРООБЪЕКТОВ

3.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСКОПОВ

Микроскоп является сложным средством контроля, предназначенным для наблюдения объектов с большим увеличением и высокой разрешающей способностью.

Основные характеристики микроскопов:

- увеличение;
- светосила;
- поле зрения;
- глубина резкого изображения;
- разрешающая способность.

Под *увеличением микроскопа* понимают отношение размера изображения на сетчатке глаза, образованное при наблюдении через микроскоп, к размеру изображения, полученному на сетчатке при наблюдении невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения. Это увеличение микроскопа принято называть *видимым*.

Видимое увеличение микроскопа

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'}$$

где f' – фокусное расстояние всего микроскопа, мм.

На практике часто применяют также формулу

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок}$$

где $\beta_{об}$ – увеличение микрообъектива; $\bar{\Gamma}_{ок}$ – увеличение окуляра.

Эти значения обычно нанесены на корпусах микрообъективов и окуляров.

Это наиболее распространенное выражение для определения общего увеличения микроскопа, которое равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра.

В отдельных микроскопах объектив рассчитывают при условии, что объект находится в его переднем фокусе, а изображение – в бесконечности. В этом случае говорят, что оптическая длина тубуса микроскопа равна бесконечности. За объективом в параллельном пучке лучей устанавливается *тубусная линза* с фокусным расстоянием $f'_{мин}$. В заднем фокусе этой линзы получается действительное перевернутое изображение препарата с увеличением

$$\beta_{об.тл} = -\frac{f'_{тл}}{f'_{об}}$$

Другие важные характеристики микроскопа связаны не с положением его элементов на оптической оси, а с диаметрами диафрагм и оправ линзовых систем. Сюда относятся светосила прибора, его поле зрения, глубина резкого изображения и разрешающая способность.

Светосилу микроскопа определяет конус лучей, который выходит из осевой точки объекта и опирается на наименьшую оправу или диафрагму, называемую *апертурной диафрагмой*. Половина угла при вершине этого конуса называется *апертурным углом* u_m .

Величину $A = n \sin u_m$ называют числовой апертурой, здесь n – показатель преломления среды перед микрообъективом ($n = 1,003$ для воздуха, $n = 1,33$ для воды).

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов называют *входным* зрачком, а в пространстве изображений – *выходным* зрачком. В микрообъективах выходным зрачком служит оправа одной из последних линз или специальная диафрагма. В обоих случаях можно считать,

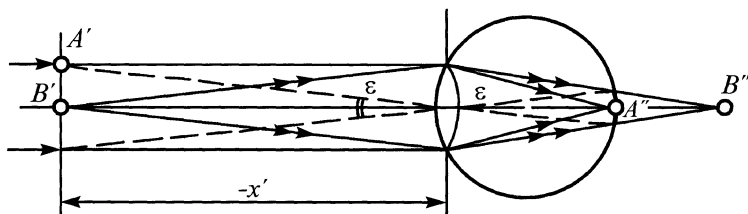


Рис. 3.1. Эквивалентная схема микроскопа

что выходной зрачок микрообъектива $D_{\text{вых об}}$ совпадает с его задней фокальной плоскостью (см. рис. 3.1), а входной зрачок объектива (и всего микроскопа) находится в бесконечности. Выходной зрачок микроскопа $D_{\text{вых}}$ есть изображение выходного зрачка объектива, образованное окуляром.

Микроскопы большого увеличения имеют малые выходные зрачки, значительно меньшие зрачка глаза. Например, при $\bar{\Gamma} = 1000\times$, $n = 1$, $\sin u_m = 1$ выходной зрачок $D_{\text{вых}} = 0,5$ мм. Это значит, что для получения достаточной освещенности на сетчатке глаза объект должен быть сильно освещен. Кроме того, дифракция света на структурных неоднородностях глаза в пределах малого зрачка затеняет изображение и ухудшает его качество. Если изображение воспринимается не глазом, а приемником, имеет значение апертура приемника.

Поле зрения микроскопа ограничивает *полевая диафрагма* D_n , которая установлена в плоскости промежуточного изображения. *Линейное поле зрения* определяется размерами предмета, изображение которого заполняет полевую диафрагму. Это поле определяется по формуле

$$l = \frac{D_n}{\beta_{\text{об}}},$$

где $\beta_{\text{об}}$ – линейное увеличение объектива.

Диаметр полевой диафрагмы зависит от поля зрения окуляра и его фокусного расстояния. Для средних окуляров этот диаметр составляет 13 ... 18 мм. Благодаря

наличию полевой диафрагмы края изображения в микроскопе резко очерчены, а плоскость изображения равномерно освещена (так как нет виньетирования наклонных пучков).

Глубина резкого изображения складывается из трех составляющих: аккомодационной, геометрической и волновой.

Аккомодационная глубина. В процессе наблюдения объемного предмета глаз непрерывно аккомодирует и просматривает разные по глубине участки предмета. Создается впечатление, что весь предмет виден одновременно резким. Если глаз аккомодирует с бесконечности до 250 мм, то резкими видны детали предмета, лежащие между передней фокальной плоскостью микроскопа и плоскостью, удаленной от фокуса на расстояние $T_{\text{ак}}$. Эта глубина $T_{\text{ак}}$ называется аккомодационной глубиной и определяется по формуле

$$T_{\text{ак}} = \frac{(f')^2}{250} = \frac{250}{\bar{\Gamma}^2}.$$

Геометрическая глубина. Пусть глаз аккомодирован на бесконечность. Тогда на сетчатке глаза резко изображены только те точки предмета, которые находятся в передней фокальной плоскости микроскопа. Точки, находящиеся дальше или ближе фокальной плоскости, изображаются на сетчатке в виде кружков рассеяния. Если угловой размер кружков рассеяния не превышает угловой разрешающей способности зрения ϵ , то соответствующие точки предмета кажутся резкими, а расстояние между ними называют геометрической глубиной.

Рис 3.1 поясняет расчет геометрической глубины для случая, когда из предмета выделены две точки: т. A лежит в фокусе, а т. B – на расстоянии x от фокуса ближе к объективу. Предмет и микроскоп не показаны, но даны изображения указанных т. A' и B' после микроскопа. Удаление x' изображения т. B' от глаза определяется по формуле

$$x' = \frac{D_{\text{гл}}}{\varepsilon},$$

где $D_{\text{гл}}$ – диаметр зрачка глаза. В дальнейших расчетах принимаем, что диаметры зрачка глаза и выходного зрачка микроскопа равны. Расстояние между т. A и B согласно формуле Ньютона определяется выражением

$$x = -\frac{(f')^2}{x'} = \frac{125\varepsilon}{A\bar{\Gamma}}.$$

Другая половина геометрической глубины соответствует точкам объекта, расположенным по другую сторону фокальной плоскости. Таким образом, геометрическая глубина резкого изображения

$$T_{\Gamma} = 2x = \frac{250\varepsilon}{A\bar{\Gamma}}.$$

Приняв угловую разрешающую способность $\varepsilon = 2'$, формулу для геометрической глубины часто записывают в виде

$$T_{\Gamma} = \frac{1}{7A\bar{\Gamma}}.$$

Волновая глубина. Образование изображения предмета световыми пучками – сложный процесс интерференции лучей в пространстве, а не в одной плоскости, причем этот процесс сопровождается обязательным ограничением пучков и дифракцией. Считают, что волновая глубина

$$T_{\text{в}} = \frac{\lambda}{2A^2}.$$

Окончательно полная глубина резкого изображения

$$T = T_{\text{ак}} + T_{\Gamma} + T_{\text{в}} = \frac{250}{\bar{\Gamma}^2} + \frac{250\varepsilon}{A\bar{\Gamma}} + \frac{\lambda}{2A^2}.$$

Разрешающая способность микроскопа. Формула для определения *разрешающей способности микроскопа*, определяемой дифракцией света, имеет вид:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A_{\text{об}}},$$

где $A_{\text{об}}$ – апертура объектива.

Нормальным увеличением микроскопа называют такое увеличение, при котором разрешающая способность микроскопа и глаза находятся в полном соответствии.

Пусть расстояние между точками A и B в плоскости объекта равно пределу разрешения δ . Тогда угловое расстояние между ними в пространстве изображений

$$\varepsilon = \frac{\delta}{f'}.$$

Чтобы глаз увидел точки A и B раздельно, величина ε должна быть не меньше предела разрешения глаза (максимальной остроты зрения). В этом случае нормальное увеличение микроскопа и значения ε определяются выражением

$$\bar{\Gamma}_{\text{н}} = \frac{250\varepsilon}{\delta}.$$

Подставив в данную формулу значение $\delta = \lambda/2A$ и $\varepsilon = 0,0003$ рад, а также приняв $\lambda = 0,55$ мкм и $A = 1,5$ (при $n = 1,5$ и $\sin u_m = 1$), получим

$$\bar{\Gamma}_{\text{н}} \approx 410^{\times}.$$

Увеличение меньше $\bar{\Gamma}_{\text{н}}$ не дает возможности различить те детали объекта, которые разрешены объективом, но слишком мелки для разрешения глазом (предел разрешения определяет глаз).

Увеличение больше $\bar{\Gamma}_{\text{н}}$ не позволяет выявить новых деталей объекта (предел

разрешения определяет объектив), но можно наблюдать эти детали под углом больше $1'$. Повышение угла ε до $2 \dots 4'$ считают полезным, так как у большинства биологических препаратов контраст мал и острота зрения $\varepsilon = 1'$ в таких условиях не достигается. Поэтому полезным увеличением $\bar{\Gamma}_n$ микроскопа считается значение, которое в 2–4 раза превышает нормальное:

$$2\bar{\Gamma}_n < \bar{\Gamma}_n < 4\bar{\Gamma}_n.$$

Увеличение больше $4\bar{\Gamma}_n$ бесполезно, так как при нем выходной зрачок микроскопа настолько мал, что качество изображения заметно ухудшается.

3.2. ОБЪЕКТИВЫ И ОКУЛЯРЫ МИКРОСКОПОВ

Объектив и окуляр микроскопа участвуют в создании изображения неодинаково. Объектив – наиболее сложная и ответственная часть микроскопа – работает в широких пучках (с большой апертурой), но с малым наклоном этих пучков к оптической оси (малое поле). Окуляр работает в узких пучках, но с большим их наклоном (большое поле). При расчете объективов и окуляров это различие проявляется в коррекции соответствующих аберраций.

К аберрациям широкого пучка относятся сферическая аберрация, кома и хроматизм положения; к полевым аберрациям – астигматизм, кривизна изображения, дисторсия и хроматизм увеличения.

Микрообъектив – система апланатическая. Это означает, что для пары сопряженных точек на оси устранена сферическая аберрация и выполнено условие синусов. Таких апланатических точек для каждого объектива только две, поэтому любые нарушения расчетного положения объекта и изображения приводят к ухудшению коррекции аберрации.

Объективы микроскопов различают:

1) по степени коррекции аберраций: ахроматы, полуахроматы (флюоритовые), апохроматы, монохроматы, плана-

хроматы и планапохроматы;

2) по длине тубуса микроскопа: тубус 160 мм для проходящего света с покровным стеклом толщиной 0,17 мм и более; тубус 190 мм для отраженного света без покровного стекла; тубус-бесконечность для проходящего и отраженного света;

3) по свойствам иммерсии: безымерсионные (сухие), иммерсионные (масляная, водная, глицериновая и другая иммерсия);

4) по оптическому устройству: линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые;

5) по апертуре и угловому увеличению (деление условное): слабые ($A \leq 0,2$ и $\beta \leq 10^\times$); средние ($A \leq 0,65$ и $\beta \leq 40^\times$); сильные ($A > 0,65$ и $\beta > 40^\times$).

У объективов-ахроматов соблюдено условие апланатизма и уничтожен хроматизм положения для двух цветов. Астигматизм внеосевых точек поля зрения не превышает допустимой величины (– 4 диоптрий). Остается неисправленным вторичный спектр.

Слабые ахроматы с апертурой 0,1 ... 0,15 обычно состоят из одного компонента, склеенного из двух линз. Ахроматы с апертурой до 0,2 имеют два ахроматических компонента. Для увеличения апертуры до 0,3 вводится плоско-выпуклая линза. Эта фронтальная линза определяет фокусное расстояние объектива, а остальные линзы исправляют аберрации ее плоской и сферической поверхностей. Аберрации плоской поверхности в сильных объективах устраняют применением иммерсии.

Сильные ахроматы, обычно иммерсионные, состоят из четырех компонентов: фронтальной линзы, мениска и двух двухлинзовых компонентов.

В объективах-апохроматах практически устранен вторичный спектр, выполнено условие синусов по меньшей мере для двух цветов, исправлена сферохроматическая аберрация. Весьма совершенное устранение хроматизма для точки на оси достигается применением особых марок стекол и кристаллов.

Планахроматы и планапохроматы – это объективы с дополнительно исправленной кривизной изображения, применяемые для важных визуальных наблюдений и для цветной фотографии. Высокое качество изображения достигнуто дальнейшим усложнением оптической системы объектива и применением сверхтяжелых кронов и особых флинтв.

Объективы-монохроматы используют в отдельных участках (шириной не более 20 нм) УФ-области спектра. Эти объективы состоят из набора одиночных линз, выполненных из кварца, флюорита или фтористого лития. Для видимой области спектра монохроматы применять нельзя.

Для многих исследований необходимы объективы, работающие в широком диапазоне спектра (ультрафиолетовая, видимая и инфракрасная области) и не требующие перефокусировки, т.е. не обладающие заметным хроматизмом. Такие объективы разработаны в виде зеркальных и зеркально-линзовых систем. Основным недостатком таких систем заключается в центральном экранировании значительной части пучка (до 25 % по площади зрачка). В новых зеркально-линзовых системах, у которых остаточные aberrации двух концентрических зеркал взаимно компенсируются и числовая апертура увеличивается линзовыми компонентами, этот недостаток значительно уменьшен благодаря применению полупрозрачных зеркал и склеенной конструкции объектива, позволяющей исключить экранирующие свет оправы зеркал. Достигнуто центральное экранирование не выше 4 % по площади зрачка при удовлетворительной коррекции системы до апертуры $A = 1,4$.

Окуляр микроскопов. *Окуляры Гюйгенса* применяют для объективов-ахроматов. Они состоят из двух плосковыпуклых линз – коллективной и глазной, обращенных выпуклыми поверхностями к объективу.

Удаление выходного зрачка окуляра Гюйгенса составляет примерно одну треть

его фокусного расстояния. Этого удаления достаточно для удобного наблюдения, если увеличение не превышает $15\times$. Наиболее распространены окуляры с увеличением $7\times$ и $10\times$. Угловое поле зрения окуляра не превышает 30° .

Окуляр Гюйгенса уменьшает продольные размеры микроскопа, имеет линзы, которые по диаметру меньше изображения, даваемого объективом. Это основной окуляр наблюдательных микроскопов. Для измерительных целей окуляр Гюйгенса применяют редко, так как он дает изображение сетки одной глазной линзой.

Окуляр Кельнера также состоит из двух плосковыпуклых линз – одиночной коллективной, повернутой плоскостью к объективу, и склеенной глазной, повернутой плоскостью к глазу. Aberrации хорошо исправлены для поля $40 \dots 50^\circ$. Передний фокус окуляра Кельнера находится впереди коллектива на расстоянии, приблизительно равном $0,3 f'_{ок}$, поэтому световой диаметр коллектива значительно больше, чем в окуляре Гюйгенса. Общая длина окуляра составляет $1,25 f'_{ок}$.

Ортокоспические окуляры применяют в соединении с объективами-ахроматами средних апертур в тех случаях, когда желательно иметь большое окулярное увеличение и угловое поле зрения до 50° .

Компенсационные окуляры применяют в соединении с объективами-ахроматами, планобъективами и ахроматами больших увеличений. Эти окуляры компенсируют хроматизм увеличения применяемых с ними объективов. Компенсационные окуляры по своей схеме аналогичны усложненному окуляру Гюйгенса или ортокоспическому окуляру.

3.3. МЕТОДЫ ОСВЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

подавляющее большинство объектов, исследуемых под микроскопом, являются несамосветящимися; такие объекты следу-

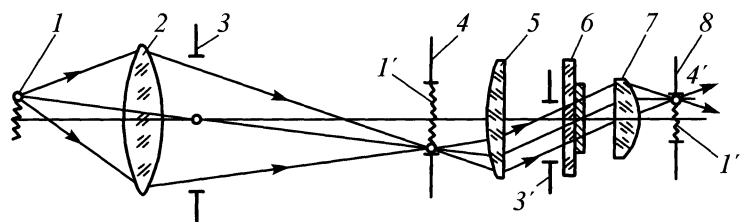


Рис. 3.2. Схема нормального освещения по Келеру (светлое поле):

1 – источник света; 2 – коллектор; 3 – диафрагма; 4 – апертурная диафрагма; 5 – конденсор; 6 – объект; 7 – микроскоп; 8 – выходной зрачок

ет освещать. Важная роль специального осветителя объясняется тем, что от его апертуры зависит разрешающая способность микроскопа, а от его схемы – контраст и равномерность освещения препарата.

Микропрепараты делятся на две группы: прозрачные (тонкие срезы, жидкости, тонкие шлифы минералов и т.п.) и непрозрачные (травленные шлифы металлов и др.). Соответственно имеется две группы осветительных устройств для проходящего и отраженного света.

При микроскопических исследованиях широко пользуются освещением объектов по методу светлого и темного поля.

Освещение по методу *светлого поля* заключается в том, что лучи из осветителя, пройдя объект (проходящий свет) или зеркально отразившись от его поверхности (отраженный свет), попадают непосредственно в объектив, создавая позитивный амплитудный контраст, т.е. изображая поглощающие или плохо отражающие участки объекта темными на общем светлом фоне (поле).

Темное поле означает такое освещение, когда лучи из осветителя непосредственно в объектив не попадают, и общий фон (поле) получается достаточно темным. На этом фоне светлыми выглядят те участки объекта, которые рассеивают свет (или диффузно отражают) или наклон которых меняет направление света. Таким

образом, в темном поле образуется негативный контраст изображения, а в светлом – позитивный.

Темное поле достигается применением осветителей, апертура которых обязательно больше апертуры объектива.

Осветители для проходящего света.

Наиболее употребительной в микроскопии схемой нормального освещения препарата в *проходящем свете* и *светлом поле* является схема Келера (рис. 3.2). Коллектор 2 проецирует источник света 1 в плоскость апертурной диафрагмы 4 конденсора 5.

Апертурная диафрагма установлена в передней фокальной плоскости конденсора и проецируется им в бесконечность. Как известно, входной зрачок микроскопа также находится в бесконечности, поэтому схема Келера обеспечивает правильное соединение осветителя и микроскопа. После объектива микроскопа 7 изображение апертурной диафрагмы образуется в его выходном зрачке 8. Полевая диафрагма 3 проецируется конденсором в плоскость объекта 6.

Схема Келера характеризуется тем, что через каждую точку объекта проходят лучи, вышедшие из всех точек источника. Это означает, что объект освещен равномерно. Кроме того, освещаемая часть поля зрения ограничивается с помощью полевой диафрагмы; такая регулировка уменьшает количество рассеянного света и повышает контраст изображения. И, на-

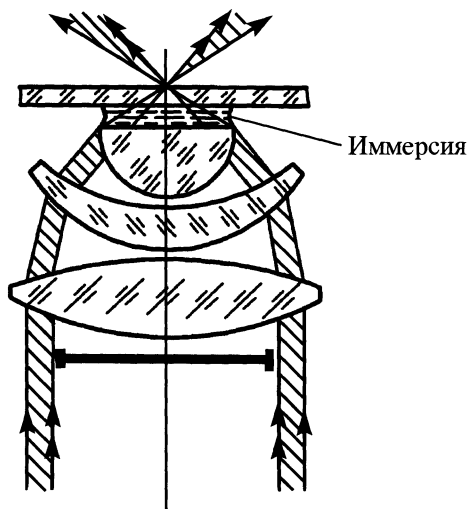


Рис. 3.3. Трехлинзовый конденсор темного поля

конец, с помощью апертурной диафрагмы изменяется апертура конденсора. Теоретически апертуры конденсора и объектива должны быть равны, однако на практике для ослабления рассеянного света апертуру конденсора всегда устанавливают несколько меньше апертуры объектива.

Кроме методов светлого и темного поля, известен также *метод косого освещения*. Косое одностороннее освещение получается при частичном закрытии апертурной диафрагмы до $1/2 \dots 1/3$ ее диаметра и смещении ее с оптической оси. Такое освещение заметно повышает контраст изображения, особенно при наблюдении штрихов и царапин, направление которых перпендикулярно падающему свету.

Осветитель темного поля создает в центральной части поля зрения полый конус лучей с апертурой, превышающей апертуру объектива. Чем меньше по глубине освещенное пространство, тем качественнее изображение; причина этого кроется в малой глубине резкого изображения микроскопа.

В настоящее время для наблюдения прозрачных объектов в темном поле применяют линзовые и зеркальные (парабо-

лоидные и кардиоидные) конденсоры.

На рис. 3.3 показана оптическая схема трехлинзового конденсора; освещающие лучи имеют апертуру от 1 до 1,4. Центральная часть параллельного пучка задерживается диафрагмой. Такие конденсоры характеризуются большими aberrациями и поэтому применяются редко.

Кардиоиды-конденсоры дают апланатическое изображение и являются наиболее совершенными из всех зеркальных конденсоров.

В современных кардиоидах-конденсорах асферическая поверхность заменена сферой ближайшего радиуса без значительного ущерба для качества изображения. Переход со светлого поля на темное осуществляется установкой перед апертурной диафрагмой прозрачного кольца, которое экранирует линзу светлого поля, но пропускает свет в кардиоид-конденсор. Апертурная диафрагма в методе темного поля открывается полностью.

Разновидностью метода темного поля является *метод ультрамикроскопии*. Он широко применяется в химии при изучении растворов, микрохимических реакций и т.п. Темное поле высокого качества и интенсивное освещение позволяют обнаружить в препарате частицы, размеры которых на один-два порядка меньше предела разрешения. Это явление не означает, что нарушены физические законы, речь идет о наблюдении не самих частиц, а только того света, который на них дифрагировал (рассеялся). Таким образом, в поле зрения будут наблюдаться светлые точки, которые свидетельствуют о наличии частиц, но ничего не говорят об их размерах.

Осветители для отраженного света.

На рис. 3.4. представлена принципиальная оптическая схема осветительного устройства металлографического микроскопа по методу светлого (рис. 3.4, а) и темного (рис. 3.4, б) поля. Схема светлого поля обеспечивает нормальное освещение по Келеру. Источник света *l* изображается

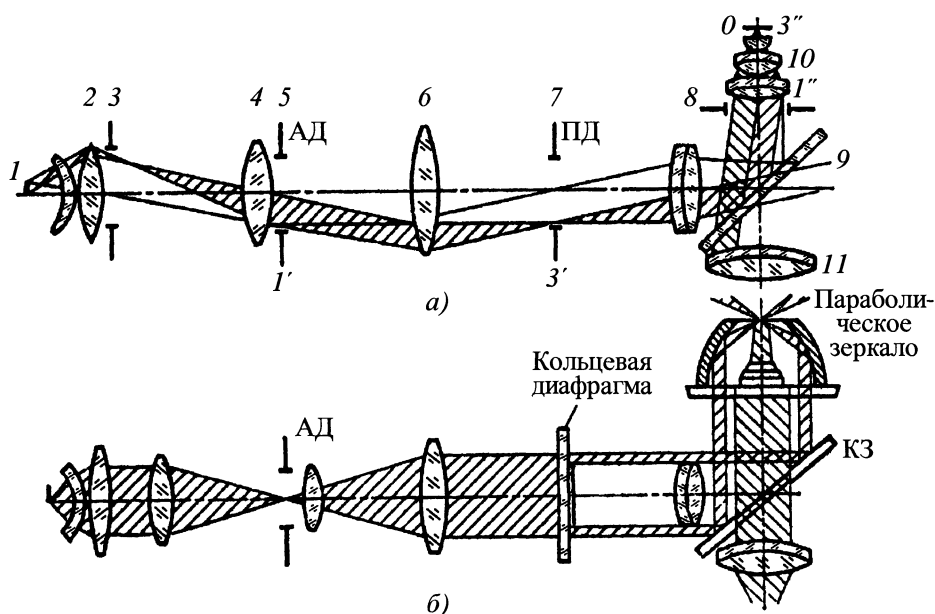


Рис. 3.4. Осветительная система металлографического микроскопа:

а — со светоделительной пластинкой; б — с кольцевым зеркалом

коллектором 2 на апертурной диафрагме 5, которая находится в переднем фокусе линзы 6. Линзы 6 и 8 действуют как оборачивающая система и проецируют апертурную диафрагму в выходной зрачок объектива 10, совпадающий с его задним фокусом $F'_{об}$. Объектив 10 рассчитан на тубус бесконечность и работает совместно с ахроматическим объективом 11. Линзы 4 и 6 действуют аналогично оборачивающей системе и изображают оправу 3 коллектора 2 в плоскости полевой диафрагмы 7. Эта диафрагма установлена в фокусе линзы 8 и проецируется ею и объективом 10 в плоскость предмета 0.

На рис. 3.4, а светоделительное устройство показано в виде полупрозрачной пластинки 9 (в некоторых приборах устанавливается светоделительный кубик). Такой способ освещения носит название *схемы Бека*. В *схеме Наше* вместо пластинки, перекрывающей всю ширину пучка, установлена призма полного внутрен-

него отражения, перекрывающая половину светового пучка микроскопа.

В схеме Бека нет ограничения апертуры объектива, но используется не более 25 % падающего из осветителя света и образуются вредные рефлексии, уменьшающие контраст изображения.

В схеме Наше апертура объектива уменьшена экранирующим действием призмы, но используется 50 % света (с учетом перекрытия половины пучка) и устранено влияние рефлексии. Эту схему чаще применяют при микрофотографировании.

При методе темного поля источник света проецируется в апертурную диафрагму АД. Параллельный пучок лучей ограничивается кольцевой диафрагмой, отражается от кольцевого зеркала КЗ и собирается параболическим зеркалом на объекте. Это означает, что апертурная диафрагма одновременно выполняет роль полевой диафрагмы, так как ограничивает освещенный участок объекта.

3.4. ФАЗОВО-КОНТРАСТНЫЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В МИКРОСКОПИИ

Описанные методы могут быть полезными для изучения таких объектов, которые выделяются на фоне всего поля зрения вследствие своей способности иначе поглощать свет, чем окружающая среда (абсорбционные структуры). В микроскопии очень распространено также наблюдение объектов, отличающихся от окружающей среды главным образом по своему показателю преломления (рефракционные структуры).

Рефракционные структуры вносят изменения не в амплитуду, а в фазу проходящей волны. Однако такие структуры не могут быть непосредственно рассмотрены или сфотографированы, поскольку наши приемники реагируют не на фазу, а на амплитуду (интенсивность), которая остается неизменной при прохождении света через разные участки рефракционной структуры. Иначе говоря, в микроскопии часто приходится иметь дело с объектами, которые невидимы не потому, что они слишком малы, а потому, что они малоконтрастны. Таковы, например, некоторые бактерии, не имеющие и следов окраски и такие же прозрачные, как и жидкость, в которую они погружены. Эти малые объекты отличаются от окружающей среды только небольшим различием в показателе преломления.

Вследствие этого проходящий через них свет смещается по фазе на величину

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{об} - n_{ср})d,$$

где $n_{об}$ и $n_{ср}$ – показатели преломления объекта и среды; d – толщина объекта.

Ранее для наблюдения таких объектов применяли дифференциальное окрашивание препаратов, после чего малоконтрастные прозрачные объекты превращаются в поглощающие (контрастные) или разноцветные. Однако это не всегда возможно. Используя наличие разности в показателях преломления объекта и среды, голландский физик Цернике (1935 г.) раз-

работал новый метод – метод фазового контраста, который позволил сделать видимыми такие прозрачные объекты, как описанные выше. Метод фазового контраста основан на том, что фаза световых колебаний нулевого спектрального максимума (т.е. прямо прошедшего света), как показывает анализ, отличается от фазы колебаний спектра первого порядка (т.е. света, дифрагированного объектом) на $\pi/2$.

Интерференционная микроскопия преследует ту же цель, что и метод фазового контраста. Она позволяет получать контрастные изображения прозрачных неконтрастных объектов, причем контраст одновременно зависит от показателя преломления и толщины деталей объекта, т.е. определяется фазовыми изменениями света, проходящего через объект.

Принципы образования контрастного изображения в интерференционном и фазово-контрастном микроскопах различны. При интерференционных схемах первичное изображение в микроскопе остается в полной неприкосновенности. На вторичное (неконтрастное) изображение прозрачного объекта накладывается дополнительная световая волна (так называемая волна сравнения), от взаимодействия с которой изображение объекта не только делается контрастным, но может стать цветным.

Иными словами, в каждой точке поля зрения микроскопа световая волна, прошедшая через соответствующую точку объекта и получившая некоторое изменение фазы, встречается с другой световой волной, которую можно назвать эталонной, так как она идет мимо объекта и имеет фазу, одинаковую для всех точек поля. При наложении этих двух волн происходит интерференция, в результате которой получается усиление или ослабление освещенности отдельных точек поля. Этим и объясняется возникновение контрастного изображения в интерференционном микроскопе.

На принципе интерференционной микроскопии создают микроскопы, работающие как в проходящем, так и в отраженном свете. Кроме повышения контра-

ста, интерференционный микроскоп позволяет проводить количественные измерения разности хода в прозрачных объектах или измерять величину неровностей на поверхности непрозрачного объекта. Чувствительность интерференционных микроскопов оценивается в 0,05 ... 0,01 длины световой волны.

3.5. МИКРОПРОЕКЦИЯ И МИКРОФОТОГРАФИЯ

В основе приборов как для микропроекции, так и для микрофотографии лежит одна и та же принципиальная оптическая схема (рис. 3.5). Объект 1 и его изображение 1' остаются, как и при наблюдении, в апланатических точках микрообъектива 2. Любые нарушения этого положения приводят к потере качества изображения и потому нежелательны. Окуляр 3 работает не как луна, а как проекционный объектив. Для этого его приходится выдвигать из тубуса на такую величину, чтобы промежуточное изображение 1' оказалось перед фокусом $F'_{ок}$ и действительное изображение 1'' получилось с заданным увеличением на экране или фотопластинке 4. Увеличение окуляра в этом случае определяется по известной формуле (без учета знака)

$$\beta_{ок} = \frac{x'}{f'_{ок}},$$

где x' - расстояние от заднего фокуса $F'_{ок}$ окуляра до экрана; $f'_{ок}$ - фокусное расстояние окуляра.

После подстановки $f'_{ок}$ получаем

$$\beta_{ок} = \frac{x'}{250} \bar{\Gamma}_{ок}.$$

Так как расстояние x' обычно много больше, чем $f'_{ок}$, то его можно заменить величиной K - расстоянием от окуляра до экрана, которое в микрофотографии называется *длиной камеры*. Тогда окончательно формула для линейного увеличения микропроектора или масштаба изображения имеет вид

$$\beta = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок} \frac{K}{250}.$$

Воспользуемся известной формулой для освещенности E на экране при микропроекции

$$E = \pi \tau B \frac{A^2}{\beta^2},$$

где τ - коэффициент пропускания осветителя, препарата и микроскопа; B - яркость источника света; A - апертура объектива; β - увеличение микроскопа при проекции.

Коэффициент пропускания осветителя и микроскопа не превышает $\tau = 0,5$. В сложных микроскопах потери могут быть еще больше. Коэффициент пропускания препаратов колеблется обычно от единицы до одной десятой.

В конечном счете выходящий из прибора световой поток оказывается значительно ослабленным. Компенсировать это можно лишь повышением яркости источника, если апертура объектива и масштаб изображения определены условиями опыта. Масштаб изображения при микрофото-

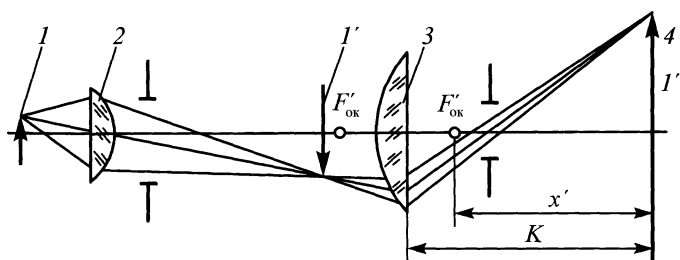


Рис. 3.5. Принципиальная схема микропроектора

графировании обычно близок или ненамного превышает видимое увеличение микроскопа, тогда как при микропроекции он может быть очень большим.

Оптическая система микропроектора должна удовлетворять самым высоким требованиям. Для устранения кривизны изображения в случае работы ахроматических и апохроматических объективов вместо окуляров применяют гомалы. Наилучший результат достигается с планобъективами, которые образуют плоское изображение по всему полю зрения.

К осветительным системам микропроекторов предъявляются два повышенных требования, а именно: источник света должен иметь высокую яркость и юстировка системы должна быть безукоризненной. Последнее достигается путем особо тщательной настройки осветительной системы по способу Келера. Это дает возможность получить в высокой степени равномерную освещенность по всему полю зрения, а количество рассеянного света свести до минимума.

3.6. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДИК

Ультрафиолетовая микроскопия. За последнее время ультрафиолетовая микроскопия получает все более и более широкое распространение, особенно в биологии и медицине. Это обусловлено тем, что основные процессы, происходящие в живой клетке, сопровождаются интенсивным поглощением в УФ-области спектра. Поэтому исследования в ультрафиолете позволяют получить большую количественную информацию о явлениях, сопровождающих биоэнергетические процессы.

Успешному развитию ультрафиолетовой микроскопии способствовали большие научные достижения, связанные с созданием новых эффективных источников и приемников излучения в УФ-области и специальной оптики для этой области спектра, новых средств электроники и автоматики.

Ультрафиолетовые микроскопы в зависимости от метода, положенного в ос-

нову их работы, разделяются на фотографические и фотоэлектрические.

Повышенная точность измерений обеспечивается применением двухлучевой схемы с фотометрическим клином в качестве оптического компенсатора.

Оптическая схема несколько модифицируется в зависимости от выполняемых работ: для визуального наблюдения в проходящих ультрафиолетовых лучах, для визуального наблюдения с фазово-контрастным устройством и для микро-спектрофотометрических измерений. Последний вид работы обеспечивает наибольшую количественную информацию об исследуемом препарате. В этом случае препарат освещается сверху через объектив микроскопа.

Инфракрасная микроскопия. Применение инфракрасных лучей в микроскопии существенно расширяет возможности исследований органических и неорганических микрообъектов.

Рассмотрим устройство распространенного инфракрасного микроскопа, предназначенного для исследования полупроводников, минералов, ИК-стекол и других объектов в инфракрасных лучах в диапазоне длин волн 0,75 ... 1,2 мкм.

С помощью микроскопа можно производить визуальное наблюдение и фотографирование в видимых и инфракрасных проходящих и отраженных неполяризованных лучах в светлом и темном поле, в проходящих поляризованных видимых и инфракрасных лучах при ортоскопическом ходе, в проходящих поляризованных инфракрасных лучах при коноскопическом ходе.

Развитию инфракрасной микроскопии способствовало создание отечественных электронно-оптических преобразователей с широкими пределами спектрального диапазона, охватывающими ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, с высоким коэффициентом преобразования и хорошей разрешающей силой.

Люминесцентная микроскопия. Действие люминесцентных микроскопов основано на использовании люминесцен-

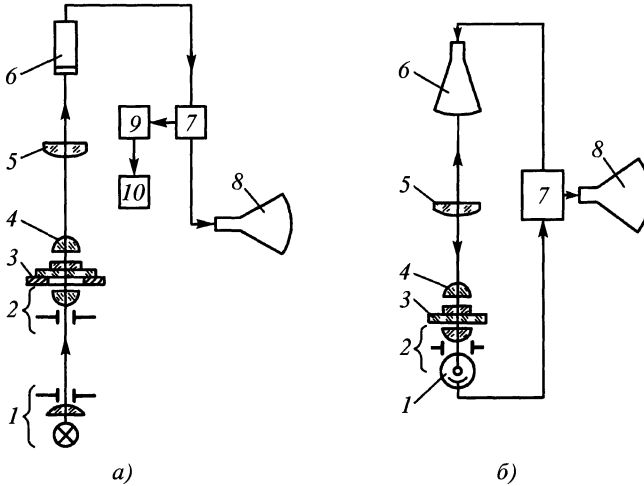


Рис. 3.6. Принципиальные схемы телевизионных микроскопов

ции объектов, возникающей при их облучении светом с определенной длины волны.

Это позволяет наблюдать и фотографировать изображения изучаемых объектов в свете люминесценции по методу светлого и темного поля.

Поляризационная микроскопия.

Поляризационные микроскопы предназначены для изучения так называемых анизотропных материалов, прозрачных и непрозрачных, и широко используются в геологии, минералогии, петрографии, стекольной промышленности, биологии.

Поляризационные микроскопы по их назначению и сложности устройства делят на следующие группы: рабочие, лабораторные, исследовательские, рудные и универсальные.

Основное отличие поляризационных микроскопов заключается в наличии поляризационных приспособлений (поляризатора, анализатора, компенсатора или фазовых пластинок).

В поляризационных микроскопах возможны две схемы исследования: ортоскопическая (исследуемый объект рассматривается непосредственно в поляризованном свете) и коноскопическая (рассматривается интерференционная картина, возникающая вследствие интерференции поляризованных лучей). В схеме первого

типа объект освещается параллельным пучком поляризованных лучей, во второй схеме – сильно сходящимися поляризованными лучами.

Дополнительным узлом при коноскопическом ходе лучей является так называемая линза Бертрана, обеспечивающая рассмотрение интерференционной картины, образующейся в задней фокальной плоскости объектива, с помощью окуляра.

Телевизионная микроскопия. В зависимости от способа освещения изучаемого объекта различают два вида телевизионных микроскопов:

- с передающей телекамерой (изображение объекта проецируется на мишень передающей TV-камеры);
- с бегущим лучом.

Микроскоп с передающей телекамерой (рис. 3.6, а) является комбинацией оптического микроскопа и телевизионного канала. Источник света 1 через конденсор 2 освещает препарат 3. Его изображение проецируется микрообъективом 4 и окуляром 5 на светочувствительный слой телевизионной камеры 6 и далее с помощью электронной системы 7 на экран кинескопа 8.

Микроскоп с передающей телекамерой можно применить для передачи изображения в естественных цветах при помощи любой системы цветного телевидения.

К передающей камере, превращающей световую энергию в электрические сигналы, предъявляются весьма жесткие требования в части высокой чувствительности, малой инерционности, низкого уровня шумов.

Иногда телевизионный микроскоп этого типа снабжается счетным приспособлением. Это бывает необходимо при определении запыленности помещений, подсчете числа аэрозолей, эритроцитов и лейкоцитов в крови и т.д. Счет частиц заменяется счетом электрических импульсов, произведенных частицами. Импульсы для счета частиц подаются из телевизионного канала 7 через электронную систему 9 к счетчику 10.

Микроскоп с бегущим пятном (рис. 3.6, б) основан на оптическом сканировании объекта движущимся световым лучом. Окуляр 5 и объектив 4 микроскопа работают в обратном ходе лучей и проецируют на препарат уменьшенное изображение раstra с экрана катодно-лучевой трубки 6, служащей источником света. Свет, прошедший через препарат 3, собирается конденсором 2 на фотоумножителе 1. При этом отдельные точки препарата освещаются последовательно по мере движения луча, образующего растр. Выходной сигнал с фотоумножителя, пропорциональный количеству прошедшего света, через электронную систему 7 поступает на кинескоп 8, развертка которого синхронизирована с разверткой трубки 6. На экране кинескопа воспроизводится изображение объекта.

Голографическая микроскопия.

Эти микроскопы предназначены для измерения оптической разности хода интерференционным голографическим методом в проходящем излучении, а также для регистрации голограмм микрообъектов и наблюдения их восстановленного изображения. Они могут работать как с собственным лазером, так и с внешним лазером импульсного или непрерывного действия.

Микроскоп содержит antivибрационный стол и собственно микроскоп. Antivибрационный стол состоит из неподвижной и подвижной частей. Неподвижная часть представляет собой раму. В верхней части рамы расположена плита с размещенной на ней пневматической подушкой, которая наполняется воздухом через штуцер. В нижней части рамы установлен блок питания лазера. К неподвижной раме прикреплен электромеханический затвор, дистанционное управление которым осуществляется с помощью выносной кнопки.

Подвижная часть представляет собой несущую раму, в верхней части которой размещена плита с установленным на ней микроскопом. В нижней части рамы находится лазер. Луч лазера направляется зеркалами, закрепленными в поворотных головках, в микроскоп.

При наполнении пневматической подушки воздухом подвижная часть поднимается с конических выступов и может совершать свободные колебания, что защищает микроскоп от внешних вибраций при регистрации голограмм и наблюдении интерферограмм в реальном времени.

В микроскопе система объектив-голограмма жестко закреплена, и фокусировка осуществляется передвижением предметного столика, имеющего грубое и плавное вертикальное перемещение с помощью механизма для наводки на резкость. Препаратоводитель столика позволяет перемещать объект в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а также обеспечивает его разворот вокруг вертикальной оси.

Для наблюдения интерферограмм микрообъектов в реальном времени обязательно осуществлять фотохимическую обработку записанной голограммы на месте экспонирования, а достаточно снабдить ее рамкой с системой тонкой юстировки по трем координатам. Поэтому для каждого объектива, входящего в комплект микроскопа, может быть изготовлена "своя"

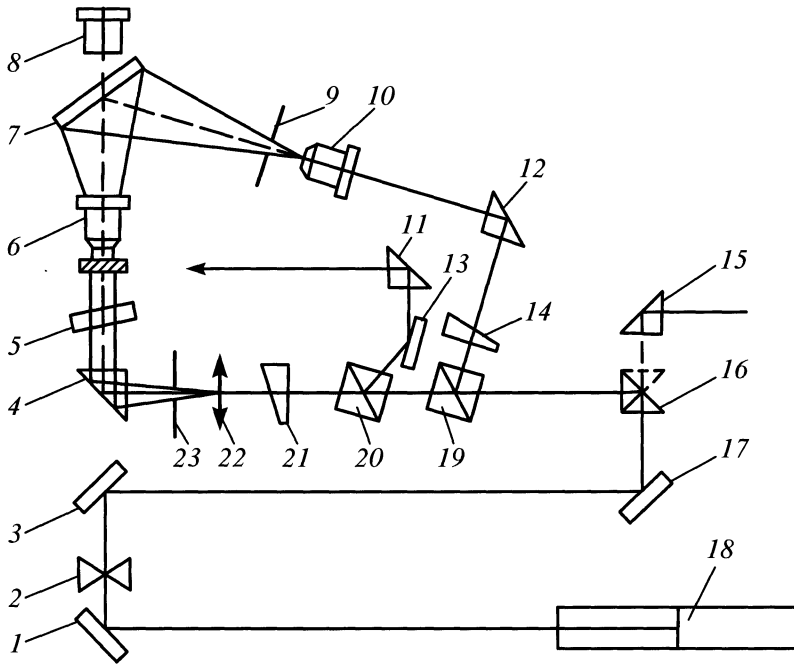


Рис. 3.7. Оптическая схема голографического интерференционного микроскопа

голограмма, установка которой после фотохимической обработки в рамку с системой тонкой юстировки позволяет отказаться от обработки фотопластинки на месте экспонирования. Это дает возможность менять как окуляры, так и попарно объективы с соответствующими им голограммами, подбирая нужное увеличение для каждого микрообъекта непосредственно при наблюдении его интерферограмм в реальном времени.

Оптическая схема микроскопа приведена на рис. 3.7. Луч лазера 18 направляется зеркалами 1, 3, 17 и призмой 16 (при использовании внешнего ОКГ его излучение отражается призмой 15 и также направляется на призму 16, которая разворачивается в этом случае в положение, обозначенное штриховой линией) на светоделитель 19, делящий его на два луча – сигнальный и опорный. Сигнальный луч трансформируется линзой 22 и диафрагмой 23 в расходящийся пучок, который

направляется призмой 4 на объект. Плоскопараллельная пластина 5 осуществляет при повороте параллельный сдвиг луча. Объектив 6 установлен за объектом; световой пучок после объектива попадает на фотопластинку 7. Наблюдение объекта проводится через окуляр 8. Часть сигнального луча, отраженная светоделителем 20, направляется зеркалом 13 и призмой 11 на объект для его боковой подсветки.

Опорный луч направляется призмой 12 через короткофокусный объектив 10 и точечную диафрагму 9 также на фотопластинку 7.

Интенсивность сигнального и опорного пучков может регулироваться нейтральными клиньями 14 и 21. Время экспонирования голограммы ограничивается электромеханическим затвором 2.

Стереомикроскопы находят применение при контроле интегральных схем и других прецизионных изделий. Наиболее широко применяют стереомикроскопы, их

выпускают в двух модификациях, соответствующих схемам Грену и Аббе.

Схема Грену состоит из двух оптических каналов (угол между оптическими осями которых $12 \dots 18^\circ$), что облегчает работу по рассматриванию дефектов, так как при этом глаза оператора конвергированы (сведены) под углом, соответствующим рассматриванию объектов, расположенных в непосредственной близости от оператора. Таким образом, условия работы на микроскопе соответствуют естественным условиям наблюдения близких объектов.

В схеме Аббе оптические оси окуляров параллельны, что приводит к некоторому несоответствию условий работы при контроле близких объектов, так как оптические оси глаз в естественных условиях параллельны только при наблюдении удаленных объектов. В то же время в схеме Аббе легче реализовать плавное (панкратическое) изменение масштаба изображения, что удобно при контроле.

Лазерные сканирующие микроскопы. С помощью ЛСМ можно формировать изображения с более высокими разрешениями и большей глубиной резкости, чем в традиционной микроскопии, в частности, с использованием различных специфических методов типа динамической фокусировки. Кроме того, методы лазерного сканирования позволяют регистрировать свет, диффузно рассеиваемый малыми деталями поверхности, размеры которых гораздо меньше поперечного сечения падающего сканирующего лазерного пучка (например, с помощью сканирующего пучка лазерного излучения, сфокусированного в пятно размером $50 \dots 100$ мкм, можно обнаружить микрометровые дефекты на поверхности контролируемых изделий).

Сканирование поверхности объекта лазерным пучком представляет собой активный метод, не зависящий от условий внешнего освещения. Благодаря этому можно оптимизировать многие процессы

управления и параметры работы аппаратуры. Для повышения информационного содержания выходного сигнала при сканировании объекта отраженное и рассеянное от его поверхности излучение можно регистрировать различными способами, например одним или несколькими детекторами, с использованием волоконно-оптических коллекторов. Облучение можно оптимизировать изменением интенсивности света и размеров светового пятна, а сканирование – выбором соответствующих отклоняющих устройств.

Если на фотоприемнике собираются периферические рассеянные объектом лучи, то изображение на экране дисплея получается в режиме темного поля, а если собираются центральные зеркально отраженные – то в режиме светлого поля. Одни дефекты контролируемой поверхности лучше выявляются при наблюдении в режиме светлого поля, другие – в режиме темного поля.

Подобная схема применяется для контроля пластин интегральных схем, т.е. пластин, которые прошли различные фазы обработки и имеют рисунки, вытравленные или нанесенные на их поверхности. Поиск дефектов в пластинах с нанесенным рисунком чрезвычайно труден из-за сложности самих рисунков. С точки зрения контроля качества важен поиск не только инородных дефектов, микрочастиц, пылинок, царапин, но и дефектов самого рисунка. Такая система позволяет сформировать и выделить изображения частиц на поверхности с нанесенным рисунком схемы. Особенности формы частиц обуславливают значительное рассеяние света под очень большими углами. В то же время интенсивность высоких порядков дифракции на рельефных деталях рисунка мала. Окончательно сигналы, связанные с частицами и со структурой рисунка, разделяются схемой сравнения, вводимой после фотоприемника. Это существенно улучшает визуальный поиск дефектов на пластинах интегральных схем.

Время формирования кадра в ЛСМ составляет 0,1 ... 1с. Для исключения мерцания изображения в нем использовано цифровое графическое ОЗУ, сигнал с которого через процессор микроЭВМ или через специальный контроллер поступает на телевизионный экран видеодисплея в реальном времени (25 кадр/с). Таким образом, ЛСМ реализует режим медленной записи с телевизионным темпом вывода сформированного изображения, он позволяет изменять масштаб изображения, управлять режимом сканирования, а также наблюдать объект в люминесцентном свете (при этом прибор работает с УФ гелий-кадмиевым лазером). Для полупроводниковых структур можно получать их "фотоответные" изображения. В этом режиме объект сканируется лазером, а сигнал снимается непосредственно с контактов, нанесенных на само изделие, что позволяет определить равномерность концентрации носителей в материалах типа кремния, германия и т.п.

В наиболее совершенных лазерных микроскопах применяют системы автофокусировки. Большинство современных ЛСМ снабжено автоматизированной системой обработки изображений (АСОИЗ). Матрица чисел, хранящаяся в цифровой памяти ЛСМ, адекватно отображает яркостное поле объекта, т.е. его изображение в заданных условиях освещения.

С помощью АСОИЗ проводят предварительную (рутинную) обработку изображения и вычисляют поля каких-либо величин (фотопроводимости, шероховатости, показателей преломления и т.п.), связанных с оптико-физическими характеристиками объекта функциональными или корреляционными зависимостями. Основные задачи рутинной обработки, решаемые в реальном масштабе времени с помощью встроенных ЛСМ процессоров и блоков постоянной памяти: измерение размеров и координат объектов зрения (обычно с помощью маркера, перемещаемого оператором), вывод на экран яркостных профилей вдоль любой строки изо-

бражения, выделение на изображении линий равного уровня яркости (изофат), вывод гистограмм распределения яркостей по элементам изображения, выполнение арифметических операций под двумя изображениями (одно из которых обычно принимается эталонным), двухмерное дифференцирование и корреляционная обработка изображений, их цифровая пространственная фильтрация и т.д. Обычно эти операции выполняются в интерактивном режиме по воле оператора. Задачи вычисления полей физических величин, распознавания образов (определение типа, классификация дефектов) и тому подобное решаются с помощью персональной ЭВМ, связанной с ЛСМ.

В компьютерных фазовых ЛСМ с интерферометрической регистрацией микро-рельефа поверхности, оснащенным прецизионным пьезоприводом, достигнута чувствительность порядка 1 нм к перепадам высот микронеровностей при латеральном (в плоскости образца) разрешении порядка 1 мкм. Разработанные в последнее время сканирующие микроскопы ближнего поля имеют разрешение до $0,01 \lambda$ (λ – длина волны света источника). Это достигается за счет облучения объекта через микро-диафрагму и регистрацией прошедшего света чувствительным фотодетектором. Толщины образцов – доли микрометра.

Иллюстрацией может служить универсальный лазерный сканирующий интроскоп-микротомограф, сконструированный в Московском Государственном Университете. Он представляет собой многофункциональный растровый оптический микроскоп (РОМ), сопряженный с растровым электронным микроскопом. Блок-схема универсального лазероскана изображена на рис. 3.8.

Источником монохроматического излучения является He-Ne лазер 2 (ЛГ-126), обеспечивающий генерацию монохроматического излучения на трех длинах волн $\lambda_1 = 0,63$ мкм, $\lambda_2 = 1,15$ мкм и $\lambda_3 = 3,39$ мкм. Мощность излучения на длине волны 0,63 мкм составляет примерно $3 \cdot 10^{-2}$ Вт.

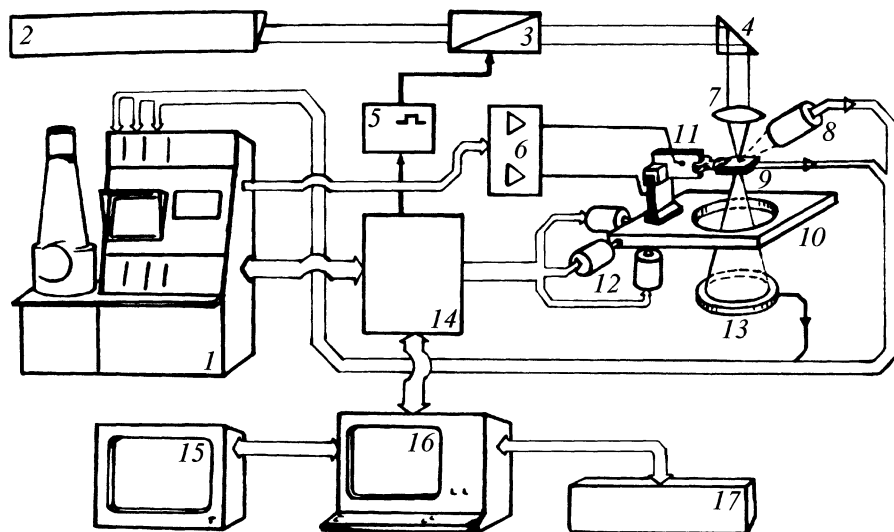


Рис. 3.8. Схема универсального лазерного сканирующего интероскопа-микротомографа:

- 1 – растровый электронный микроскоп; 2 – He-Ne лазер; 3 – электрооптический модулятор; 4 – поворачивающаяся призма; 5 – импульсный генератор; 6 – высоковольтные усилители; 7 – оптическая фокусирующая система; 8 – датчик отраженного излучения; 9 – исследуемый объект; 10 – сканирующий столик; 11 – пьезоэлектрические биморфные пластинки; 12 – реверсивные шаговые двигатели; 13 – датчик проходящего излучения; 14 – универсальный интерфейс; 15 – цветное ВКУ; 16 – миниЭВМ; 17 – печатающее устройство

При необходимости лазерный луч можно модулировать по интенсивности с помощью электрооптического модулятора (МД-102А), обеспечивающего глубину модуляции $\sim 95\%$. Модулирующий сигнал может быть как аналоговым, так и импульсным, в диапазоне частот $0 \dots 150$ МГц.

Для обеспечения управления электрооптическим модулятором используется импульсный генератор 5, позволяющий получить импульсы прямоугольной формы с частотой следования до 100 МГц. Прецизионная цифровая система установки частоты позволяет добиться большой стабильности ($\sim 10^{-6}$), что важно при исследовании малоcontrastных объектов или при наблюдении слабых эффектов.

Синхронизация и управление генератором может осуществляться через интерфейс от компьютера.

Важнейшим элементом комплекса является оптическая фокусирующая система 7. Разрешающая способность микроскопа определяется качеством оптической системы. Для получения минимального разрешения при использовании объектива $100 \times 1,30$ на исследуемый объект наносится иммерсионное масло.

Из оптической системы микроскопа удалены окуляры. Это необходимо во избежание потерь интенсивности лазерного пучка из-за расширения его короткофокусной линзой окуляра.

Отраженный свет от объекта исследования 9 падает на вход датчика отраженного света 8, которым может быть система световод-ФЭУ (ФЭУ при $\lambda_1 = 0,63$ мкм) или полупроводниковый детектор (при длине волны $\lambda_2 = 1,15$ мкм).

Прошедший через объект свет детектируется датчиком прошедшего излуче-

ния 13, который является широкоапертурным полупроводниковым детектором. Для сбора полного отраженного света применяется эллипсоид с зеркальной поверхностью.

Сигналы от полупроводниковых датчиков поступают последовательно на предварительный усилитель и на стандартный усилитель наведенного тока, входящие в комплект РЭМ, что обеспечивает высокое усиление (~90 дБ) и стабильную работу даже при слабых сигналах. Входной импеданс усилительного тракта хорошо согласован с полупроводниковыми датчиками.

Оптическая и сканирующая системы комплекса смонтированы на специальном виброгасящем основании. С целью обеспечения безаберрационного освещения исследуемого образца оптическая система остается неподвижной, а сканирование осуществляется механическим перемещением объекта. Для реализации режима отображения информации в реальном масштабе времени сканирование объекта производится с помощью двухкоординатного манипулятора из пары биморфных пьезоэлектрических пластин 11, сборка которых размещена на сканируемом столике 10. Смещение горизонтальной пластины обеспечивает сканирование объекта по оси X , а смещение вертикальной пластины – по оси Y .

Управляющее напряжение на биморфные пластины подается от высоковольтного усилителя 6, который обеспечивает усиление пилообразного напряжения, поступающего на его входы от блока развертки РЭМ. Горизонтальная пластина с объектом является менее инерционной, поэтому управление ею осуществляется пилообразным напряжением с частотой строк дисплейного раstra. Более инерционная вертикальная пластина, на которой укреплена горизонтальная пластинка с объектом, управляется пилообразным напряжением с частотой кадров.

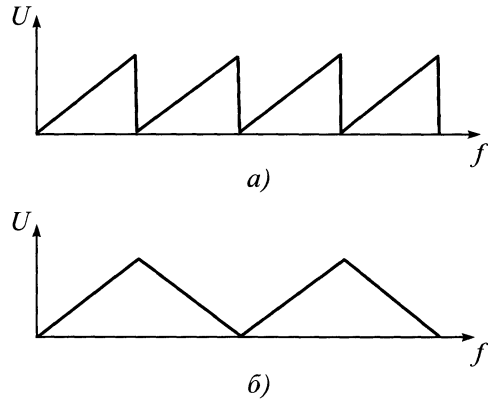


Рис. 3.9. Форма напряжения строчной развертки на входе (а) и на выходе высоковольтного усилителя (б)

Площадь сканирования объекта определяется амплитудами строчных и кадровых пилообразных напряжений, которые устанавливаются на пульте РЭМ.

Малые смещения объекта относительно неподвижного лазерного пучка также задаются с пульта. Информационные сигналы, поступающие на блоки РЭМ от разных датчиков, могут формировать изображения на дисплее РЭМ в яркостной или амплитудной модуляции.

Для устранения переходных колебаний пьезопластин во время скачкообразного обратного хода каждая четная строка используется для плавного возвращения пьезопластин в исходное положение. Как показано на рис. 3.9, четные строки инвертируются и чередуются с нечетными строками. Очевидно, что для проведения экспериментов пьезоманипулятор полностью обеспечивает линейное сканирование исследуемого объекта и может работать как автономная приставка к РЭМ.

Эта возможность комплекса имеет особо важное значение при подготовке эксперимента в ИК-диапазоне излучения лазера. Богатые возможности РЭМ позволяют оперативно добиться желаемого качества фокусировки ИК-излучения в области объекта.

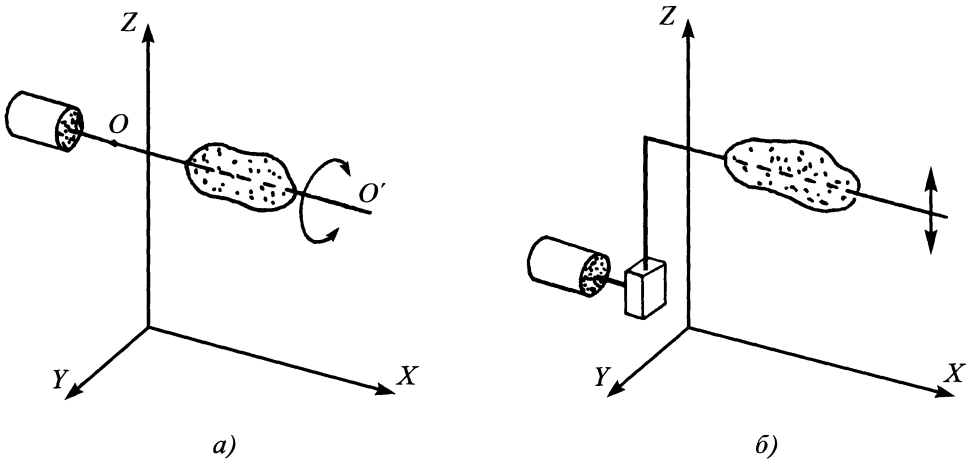


Рис. 3.10. Реализация вращательного движения вокруг оси OO' (а) и линейного поступательного движения относительно оси Z (б)

При управлении экспериментом с помощью ЭВМ 16 осуществляется два основных варианта механического сканирования объекта. В первом случае развертки РЭМ, а следовательно и перемещение пьезопластин, осуществляются от ЭВМ через интерфейс 14. Во втором варианте ЭВМ управляет шаговыми реверсивными двигателями 12, обеспечивающими перемещение исследуемого объекта в трех ортогональных направлениях. В обоих случаях информативный сигнал усиливается (и при необходимости обрабатывается) аппаратурой РЭМ и через интерфейс 14 вводится в миниЭВМ.

Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. Сканирование с помощью пьезопластин приближается к реальному масштабу времени (порядка 10 с для кадра 128×128 точек), однако диапазон перемещений объекта невелик (до 0,5 мм), а при больших смещениях объекта необходима аппаратная или программная коррекция нелинейности перемещения пьезопластин. Кроме того, исследуемый образец должен быть достаточно мал, чтобы не нагружать пьезопластины и не увеличивать инерционность. Сканирование с по-

мощью шаговых двигателей происходит гораздо медленнее из-за большей инерционности механических узлов (порядка 5 мин для кадра 128×128 точек) и требует программной коррекции возможных люфтов в передаточных механизмах. Но в этом случае диапазон перемещений объекта существенно больше ($1 \times 2 \times 0,2$ см), а перемещения эквивалентны.

Изображение исследуемого объекта формируется построчно либо на графическом дисплее ЭВМ, либо на цветном и (или) черно-белом полутонном мониторе 15, а при надобности записывается на гибкие или жесткие магнитные диски.

Очевидно, что при управлении экспериментом с помощью ЭВМ в принципе можно полностью отказаться от использования РЭМ (применять автономные усилители сигналов) и, наоборот, управлять экспериментом только с помощью аппаратуры РЭМ, т.е. реализовать полностью аналоговый и полностью цифровой варианты проведения эксперимента в зависимости от имеющегося оборудования и класса решаемых задач.

Для проведения томографических исследований твердотельных структур в

комплексе предусмотрено еще две степени свободы объекта:

1) для реализации классического метода томографии образец можно вращать вокруг своей оси, которая перпендикулярна оси пучка зондирующего излучения (см. рис. 3.10, а).

2) образец может перемещаться относительно вертикальной оси Z и параллельно плоскости XOY (см. рис. 3.10, б).

Поворот образца вокруг его оси и его смещение относительно оси в принципе являются эквивалентными. С помощью ЭВМ управляется один шаговый двигатель, а сменой механических узлов реализуется как вращательное, так и линейное движение объекта. Основные параметры сканирования: шаги смещения по осям X и Y – 1 мкм, по оси Z – 0,5 мкм, угол поворота $1,8^\circ$.

Качество изображения и точность экспериментальных результатов во многом определяется методом выделения или обработки информации.

В описанном выше устройстве для изучения слабоконтрастных объектов или слабых эффектов применяются динамические методы выделения информации. Резонансный метод осуществляется применением электрооптического модулятора и селективного усилителя. Указанный метод позволяет защитить информационный тракт от влияния шумов от посторонних источников света, которые модулированы другими частотами (излучение телевизионного дисплея) или не модулированы (дневной свет).

Дифференциальный метод выделения информации позволяет выделить дифференцированную информацию при очень слабых сигналах. В отличие от резонансного метода здесь лазерный пучок модулируется не от электрооптического модулятора, а непосредственно исследуемым объектом, который обычно приводится в колебательное движение в одном из латеральных направлений. Селективный усилитель настраивается на частоту механи-

ческих колебаний. Амплитуда колебаний регулируется и определяет чувствительность метода.

Лазерный сканирующий комплекс позволяет проводить неразрушающую проверку многих материалов и полупроводниковых приборов с использованием различных методов формирования высококачественных изображений. В отраженном свете получают информацию о металлизации, находящейся под пассивирующим покрытием, пористости, замыканиях, разломах и о других топографических неоднородностях на поверхности объекта. При регистрации прошедшего через объект ИК-излучения установка позволяет визуализировать неоднородности в объеме твердого тела, в частности в пластинах полупроводниковых материалов.

Микроскопы с оптическими квантовыми усилителями яркости изображения. В последнее время появились лазерные микроскопы с усилением яркости изображения. В ряде случаев при контроле изделий микроэлектроники, содержащих элементы малых размеров и низкого контраста, они могут быть полезны, так как расширяют возможности визуального метода контроля и измерений. В частности, лазерные микроскопы позволяют за счет большой яркости источника производить наблюдения на экране при больших ($\Gamma > 1000^\times$) увеличениях в обычных производственных условиях и не требуют затемнения.

На рис. 3.11 представлена оптическая схема такого микроскопа-проектора с лазерным усилителем яркости изображения. Главное отличие микроскопа с оптическим квантовым усилителем изображения заключается в том, что яркость лучей в пространстве изображений может на 2–3 порядка превосходить яркость лучей в пространстве предметов. Обычные оптические проекционные микроскопы не могут обеспечить на экранах умеренного размера с увеличением $\Gamma > 200^\times$ достаточную для использования в производственных условиях яркость изображения. В качестве

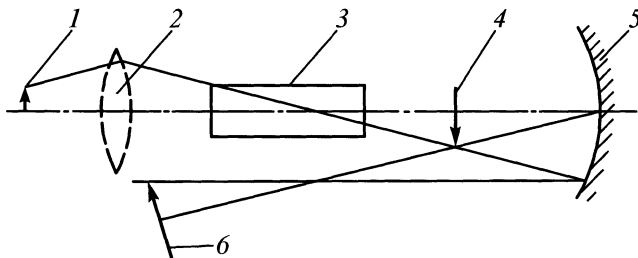


Рис. 3.11. Оптическая схема лазерного микропроектора с усилителем изображения:

1 – плоскость предмета; 2 – объектив; 3 – оптический квантовый усилитель;
4 – промежуточное изображение; 5 – зеркальный объектив; 6 – экран

усилителя яркости изображения используется лазер на парах меди (желто-зеленая область спектра). Такой лазерный микроскоп-проектор позволяет осуществлять контроль и измерения по экрану элементов с минимальным размером до 1 мкм при поле зрения $\varnothing 300$ мкм (при $\Gamma = 1000\times$). Возможность усилить яркость позволяет контролировать элементы и структуры при пониженной интенсивно-

сти облучения, что в ряде случаев, например, при обследовании светочувствительных структур, обладающих пороговыми свойствами, имеет принципиальное значение.

Лазерный микроскоп-проектор обеспечивает увеличения от $100\times$ до $1000\times$ и более на экране диаметром $\varnothing 300$ мм с яркостью, достаточной для длительной работы в обычных условиях освещения.

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ

4.1. КОНТРОЛЬ С ПОМОЩЬЮ ЖЕСТКИХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА БАЗЕ ЛИНЗОВОЙ ОПТИКИ

За последние годы получили широкое распространение визуальная дефектоскопия внутренней поверхности труб, камер и т.п., а также наблюдение за скрытыми процессами с помощью смотровых приборов на различных стадиях производства в промышленности.

Применению смотровых приборов способствовала разработка высокоразрешающих и относительно дешевых оптических систем, а также малогабаритных ламп накаливания с высокой светоотдачей.

К смотровым приборам относятся оптические средства с закрытой оптической системой, т.е. расположенные в корпусе, которые могут применяться как в полостях с прямолинейной осью, так и с ломаной. Это обеспечивает возможность диагностирования на любой глубине и с минимальными затратами времени. Большинство из таких приборов являются универсальными.

При обработке внутренних поверхностей деталей резанием имеются расточки, карманы, выточки и другие полузакрытые полости, расположенные близко от торца, которые неудобно осматривать. При сборке, а также при эксплуатации инструментов и машин в цеховых и полевых условиях часто возникает необходимость заглянуть внутрь недоступной области на глубину 0,1 ... 0,8 м собранного агрегата, не разбирая его. Для этого существуют зонды с зеркалом для осмотра и измерений внутренних поверхностей в полостях изделия.

До настоящего времени в простых системах применяют осветительные зонды

с зеркалами. Они имеют разомкнутую линию визирования (без замкнутого корпуса), для отклонения линии визирования применяют зеркало. Прибор имеет малые габариты, небольшую массу, автономный источник питания и невысокую стоимость. Такой специализированный зонд 1 состоит из зеркала 2 конусного типа, лампы 3 (рис. 4.1). В ручке размещается батарея 6, укрепленная на торце ручки. Конус соединен со штифтом при помощи резьбовой шпильки.

Современный жесткий промышленный эндоскоп (бороскоп) – это прибор, представляющий собой несколько оптических систем большой точности, в которых используется сложное сочетание призм, ахроматических и простых линз. Источник света, размещенный перед объективом, обеспечивает освещение исследуемого участка поверхности.

Изображения наибольшей яркости получаются в эндоскопах большего диаметра и меньшей длины. При увеличении длины эндоскопа яркость изображения вследствие световых потерь уменьшается.

В большинстве эндоскопов диаметр поля зрения составляет около 25 мм при расстоянии от объектива до исследуемой поверхности около 25 мм. Размер этого поля для системы с заданным коэффициентом увеличения обычно меняется в зависимости от диаметра исследуемой полости, т.е. от расстояния между объектом и объективом.

Конструкция объектива определяет угол поля зрения, размер визуального поля и количество света, проходящего через систему. Промежуточные линзы, концентрируя световую энергию, попадающую в

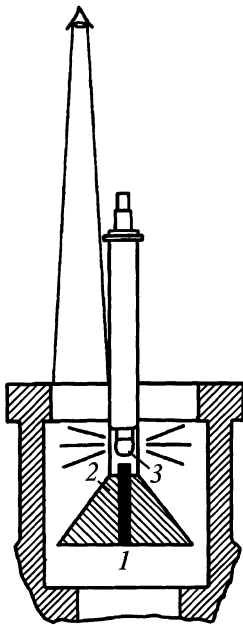


Рис. 4.1. Зонд с зеркалом для осмотра и измерений полостей среднего диаметра:
1 – зонд; 2 – коническое зеркало; 3 – лампа

оптическую систему, обеспечивают прохождение пучка световых лучей через телескопическую трубу с минимальными потерями. Конструкция промежуточных линз оказывает большое влияние на качество получаемого изображения. Для увеличения резкости и сохранения действительных цветовых характеристик изображения в эндоскопах применяют ахроматические промежуточные линзы.

В зависимости от длины телескопического участка изображение требует горизонтального, вертикального либо двойного перевертывания (инверсии). Такое перевертывание осуществляется в окулярном устройстве с помощью корректирующих линз в эндоскопах малого диаметра или линз большого диаметра. Сфокусированное изображение рассматривается с помощью окулярного устройства.

Оптическая система состоит из источника света 1 для освещения объекта, экрана 2 для защиты от засветки сменной

призмной или зеркальной насадки 3, изменяющей направление и размеры поля зрения прибора, объектива 4, основной передающей оптической системы 5 и окуляра 6 (рис. 4.2).

Чаще всего окулярные устройства бывают сменной конструкции на различные увеличения и положения глаз оператора. Окуляр может быть бинокулярным или монокулярным. Иногда снабжают эндоскопы окулярами трех типов бинокулярном с 6-, 8-, 10- и 12-кратным увеличением, стандартным окуляром с 8-кратным увеличением и монокулярном с 6-, 8- и 10-кратным переменным увеличением.

Смонтированная на шариковых направляющих телескопическая труба обычно вращается относительно окуляра против часовой стрелки и фиксируется при вращении по часовой стрелке.

Точность изготовления призм и линз эндоскопа должна удовлетворять высоким требованиям стандартов на оптические устройства. Оптическая система эндоскопа собирается с большой точностью, тщательно юстируется, чтобы обеспечить яркое, яркое и неискаженное изображение. Конструкция эндоскопа должна обладать достаточной прочностью. Детали эндоскопа обычно рассчитаны на температуру 5 ... 40 °С.

Некоторые жесткие эндоскопы специально предназначены для работы в условиях высоких температур (до 150 °С) и высоких давлений. Обычно увеличение эндоскопов 0,5 ... 5,0.

С помощью сменных призмных насадок можно осуществлять наблюдение с кольцевым полем обзора (при поиске дефектов во время предварительного осмотра) или с боковым направлением визирования (при детальном изучении поверхностей). Создан прибор, которым можно определить не только размер, но и глубину дефектов методом светового сечения с помощью специальной насадки (точность $\pm (1 \dots 2)$ мкм).

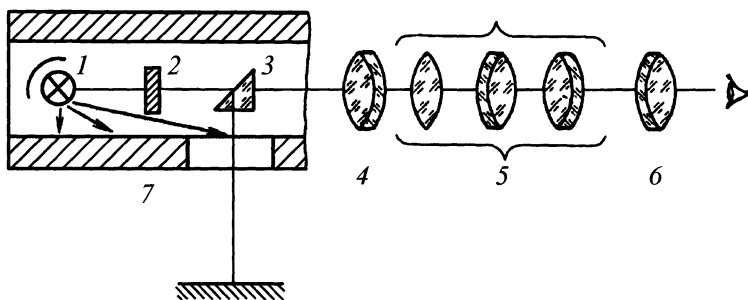


Рис. 4.2. Схема эндоскопа:

1 – источник света; 2 – экран; 3 – призматическая насадка; 4 – объектив;
5 – передающая оптическая секция; 6 – окуляр; 7 – корпус; 8 – объект контроля

Конструктивно линзовые эндоскопы выполняют в виде корпуса цилиндрической формы, внутри которого размещены все элементы прибора. Обычно в комплект входит несколько трубок. Общее количество линзовых элементов может достигать 40 ... 50, что приводит к большим потерям света. На корпусе прибора нанесена шкала для определения местоположения дефекта по длине изделия. Эндоскопами некоторых моделей можно фотографировать дефекты с помощью фотоприставки. В качестве источников освещения применяют лампы накаливания различной мощности (до 100 Вт).

Обычно линзовые эндоскопы имеют жесткую конструкцию. Однако в последнее время созданы приборы, изгибающиеся в пределах 5 ... 10°.

В некоторых приборах призматическую насадку можно наклонять с помощью механической тяги, расширяя этим поле зрения эндоскопа.

Линзовыми эндоскопами можно обнаруживать царапины, трещины, коррозионные пятна, выбоины и другие дефекты размерами 0,03 ... 0,08 мм в изделиях длиной до 10 м и диаметром 5 ... 100 мм и более.

При сканировании по окружности для измерения углового положения дефекта на окулярах эндоскопов установлены круговые проградуированные шкалы (лимбы), чаще всего со стрелочным указа-

телем. При сканировании по оси для измерения расположения дефекта по глубине полости снаружи корпуса эндоскопа нанесены штрихи с оцифровкой. При повторном использовании прибор вводят в отверстие на глубину, отмеченную мелом на корпусе.

Эндоскопы изготавливаются как цельной, так и сборной конструкции.

Конструктивно сборный прибор состоит из сменной объективной части, нескольких телескопических труб, окулярного устройства и понижающего трансформатора. Объективная часть включает оптическую призму 1 (рис. 4.3), электрическую лампу 2 с оправой 3. Телескопическая труба 5 с контактной муфтой, имеющая корпус с объективом 4 и оборачивающими оптическими системами 6, служит для передачи изображения от объективной части к линзам 13 окулярного устройства 12 и подачи электрического тока по проводам 7 к лампе, а также для монтажа прочих механических и электрических деталей. Окулярное устройство снабжено механизмом для фокусировки изображения. Для эндоскопов диаметрами 21, 38 и 55 мм оно имеет диоптрийную подвижку 11 для фокусировки изображения измерительной шкалы. Вращением обоймы 10 фокусирующей линзы совместно со шкалой окулярное устройство может перемещаться в пределах нескольких миллиметров до получения резкого изображения проверяемого участка.

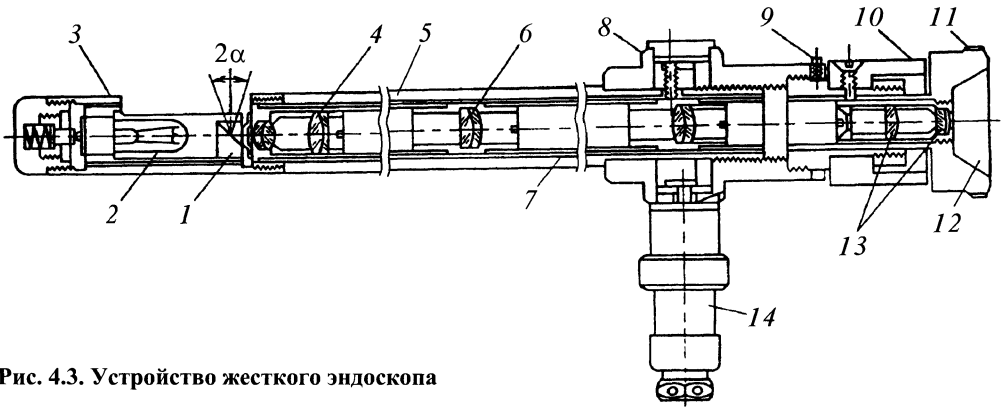


Рис. 4.3. Устройство жесткого эндоскопа

Для определения направления бокового взгляда дефектоскопа на переднем торце телескопической трубы нанесен специальный индекс 9, с помощью которого определяется угол вращения объективной части. Чтобы исключить вырывание электрического кабеля со штекером 14 при вращении трубы, на ней имеются контактные кольца, облегаемые электрической муфтой 8.

Глубина наблюдения в отверстии, регулируемая присоединением необходимого количества телескопических труб, определяется по штрихам, нанесенным на их наружной поверхности.

Для определения размера дефекта на объективе может быть нанесена прозрачная шкала, а к шкале придана переводная таблица, позволяющая по числу делений по шкале и расстоянию от проверяемого участка до точки излома оптической оси эндоскопа измерить дефект. На рис. 4.4

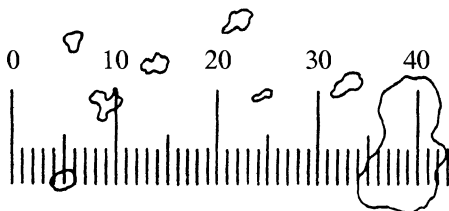


Рис. 4.4. Вид в окуляре эндоскопа: на фоне измерительной шкалы видны раковины от коррозии

приведена картина изображения дефектов поверхности (раковины) на фоне измерительной шкалы.

На рис. 4.5, а показана схема объективной части, служащая для прямого наблюдения объектов малых диаметров с помощью узкоугольного объектива. Для освещения применяют малогабаритные лампочки, расположенные по окружности, в центре которой имеется отверстие для прохода отраженного пучка лучей. Такая объективная часть используется при малом расстоянии между объектами и объективом и при наблюдении небольшого участка в глухих отверстиях.

В случае контроля дна полостей больших объемов (контейнеров, баллонов и т.п.) применяется специальная объективная часть (рис. 4.5, б), обеспечивающая прямое наблюдение объекта с применением широкоугольного объектива. Освещение проверяемой поверхности производится в направлении прямо-сбоку при помощи мощной галогенной лампы.

При достаточно широкой выточке или кармане малого диаметра, а также при большой длине передних участков детали применяется объективная часть с призмой на 45°, дающая боковое наблюдение с углом визирования 90° (рис. 4.5, в). Освещение проверяемой поверхности обеспечивается обычной лампой штекерного (патронного) типа.

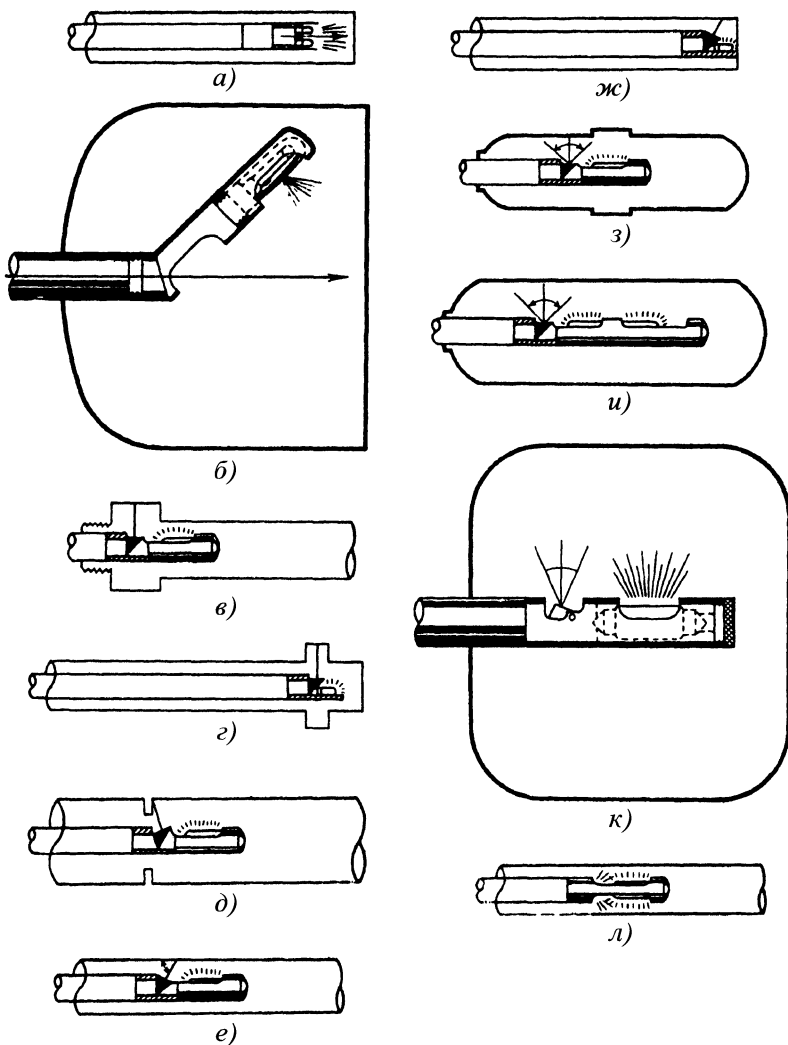


Рис. 4.5. Типы наблюдения в сменных объективных частях

При узкой выточке или кармане большого диаметра, а также при малой длине передних участков детали применяется объективная часть с призмой на 45° (рис. 4.5, *а*), дающая боковое наблюдение с углом визирования 90° , освещение обеспечивается специальными малогабаритными лампочками, размещенным под призмой.

Для детального обзора локального участка сзади существует объективная

часть (рис. 4.5, *д*). Отклонение оптической оси на угол 75° производится фиксированной призмой или зеркалом.

На рис. 4.5, *е* показана распространенная схема объективной части, служащая для наблюдения с постоянным углом визирования. Отклонение оптической оси на угол 120° производится фиксированной призмой или зеркалом. Объективная часть предназначена для контроля поверхности одного диаметра при большой длине пе-

редних участков детали. При значительном диаметре контролируемой полости применяют объективную часть с двумя лампами, при этом ее длина возрастает в 2 раза.

Для наблюдения угловых сварных швов боковых стенок и кольцевых зон (участков) цилиндрической поверхности, расположенной у торца глухого отверстия (т.е. при малой длине передних участков детали), применяется специальная объективная часть, подобная показанной на рис. 4.5, е. Малогабаритные лампочки размещены у нее под призмой (рис. 4.5, ж), что позволяет придвинуть прибор вплотную к торцу проверяемого канала.

Для расширения возможностей бокового наблюдения в ряде приборов применяется объективная часть с регулируемым отклоняющим элементом. Изменение угла визирования в пределах $75 \dots 120^\circ$ достигается за счет поворота отклоняющего элемента (призмы) относительно вертикали с помощью дистанционных средств управления, например боуденовского тросика (рис. 4.5, з). Эта конструкция обеспечивает расширенное поле зрения (наклонное назад – боковое – наклонное вперед). Объективная часть служит для осмотра полостей среднего диаметра. При необходимости более подробного наблюдения площади в полостях значительного диаметра применяют объективную часть с повышенным уровнем освещения, например с помощью двух ламп штекерного типа (рис. 4.5, и).

Для контроля объектов, имеющих штуцер или отверстие сверху или сбоку (например, цилиндров двигателей внутреннего сгорания), иногда применяют специальную объективную часть с переменным углом наблюдения (рис. 4.5, к). Для освещения исследуемой поверхности используется мощная лампа штекерного типа. Объективные части такой конструкции наиболее часто жестко монтируются на приборах диаметрами 10 и 12 мм, длиной 0,35 м.

При эксплуатации объективных частей, изображенных на рис. 4.5, а–к, сканирование по окружности производят вращением вокруг горизонтальной оси прибора или исследуемого объекта. При необходимости высокопроизводительного осмотра цилиндрической полости сразу по всей кольцевой поверхности применяется объективная часть, обеспечивающая кольцевое наблюдение (рис. 4.5, л). Для исключения участков, затемненных переключками, прибор периодически поворачивают на небольшой угол вокруг горизонтальной оси. Такой способ наблюдения применяется при осмотре полостей большой протяженности и малого диаметра

Со сменными объективными частями выпускаются эндоскопы диаметром 6 ... 45 мм и длиной 0,75 ... 12 м, что позволяет контролировать полости диаметром 6,5 ... 600 мм при соответствующих типах наблюдения: наклонное вперед, боковое, наклонное назад и кольцевое. Малогабаритные эндоскопы диаметром 3,5; 5 мм и длиной 0,1 ... 0,45 м дают возможность осматривать полости диаметром 4 ... 10 мм с помощью несъемных объективных частей, обеспечивающих следующие типы наблюдения: наклонное вперед, боковое и наклонное назад. Продольное сканирование во всех типах наблюдения обеспечивают посредством осевого перемещения прибора или исследуемого объекта. В приборах диаметром 6 ... 12 мм источник света – малогабаритная специальная лампа накаливания, а в приборах диаметром 13 ... 45 мм – галогенные лампы. Из показанных типов наблюдения чаще всего распространены кольцевое, боковое и прямое.

При контроле полостей, например труб, с помощью распространенных эндоскопов, имеющих объективные части прямого наблюдения с угловым полем зрения 35° , можно видеть только края дефекта на небольшой площади. Прибор с полем зрения 55° позволяет заглянуть внутрь дефекта несколько глубже. Эндоскоп неразборной конструкции с угловым полем

зрения 80° позволяет рассматривать дефект почти на полную глубину. Оптическая система эндоскопа, специально спроектированная для дефектоскопии труб диаметрами 4 ... 10 мм при прямом наблюдении, обеспечивает высокую разрешающую способность по внешнему краю поля зрения при освещенности на 25 % большей, чем в обычных конструкциях. Эндоскоп может использоваться как обычная зрительная труба (телескоп) при просмотре труб диаметрами 4 ... 5,5 мм на длину 1,5 ... 2,5 м.

В эндоскопах новейших конструкций с диаметром 2 ... 15 мм и длиной 125 ... 750 мм применяют наружные (внешние) источники света с некогерентными жесткими или гибкими световодами, по которым свет передается к объективной части.

На рис. 4.6 показана схема внутренней части прибора с наружным источником света для прямого наблюдения. Прибор неразборный и состоит из трубы – корпуса 2, объективной части, телескопической трубы 3, жесткого световода (кварцевый стержень) 1 для подсветки, окулярного устройства и наружной части. Объективная часть сконструирована так, что поле зрения 4 на проверяемом участке 5 перекрывается подсвечивающим пучком света 6.

Приборы диаметром 9 мм и более включают в комплект сменные телескопические трубы с кварцевым стержнем, обеспечивающие следующие типы наблюдений: боковое на угол 90° , наклонное вперед на угол 150° , наклонное назад на угол 28° и прямое на угол 180° .

Наружная часть включает необходимые оптические системы, в том числе асферический конденсор с относительным отверстием 0,8, формирующий 3-миллиметровый пучок света на входном торце кварцевого стержня. Последний при полном внутреннем отражении проектирует пучок света через косой срез на проверяемый участок. Полученное изображение передается обычным порядком через объективную часть, телескопическую трубу и

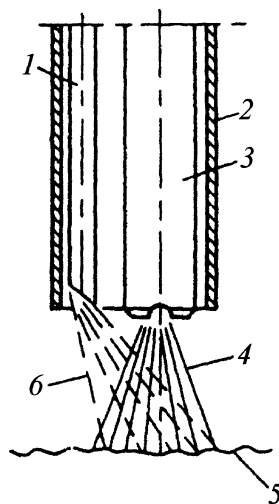


Рис. 4.6. Сменные внутренние части эндоскопов с наружной подсветкой и светопроводящим кварцевым стержнем

окулярное устройство. Описанные эндоскопы основных серий имеют наружные диаметры 3 ... 11 мм, длину 0,125 ... 0,75 м и угловое поле зрения 5, 45 и 80° .

Одновременно выпускаются эндоскопы микроскопического типа для металлографических исследований узлов без их демонтажа. В них предусматриваются два типа сменных объективов: контактный (водно-иммерсионного типа) и обычный (воздушно-разнесенного типа). Первый применяется при исследовании влажных или вибрирующих углов, второй – при исследовании узлов с грубой поверхностью или в условиях, при которых контакт нежелателен. Эндоскопы микроскопического типа выпускаются на длины 0,75; 0,4 и 0,256 м с 5-, 10-, 25-, 50- и 100-кратным увеличением на каждой длине.

Перед применением прибора проверяемый участок сначала просматривают с помощью обычного эндоскопа с широкоугольным объективом. При необходимости на участке делают требуемую подготовку (очищают, полируют и моют), после которой кварцевый стержень с телескопи-

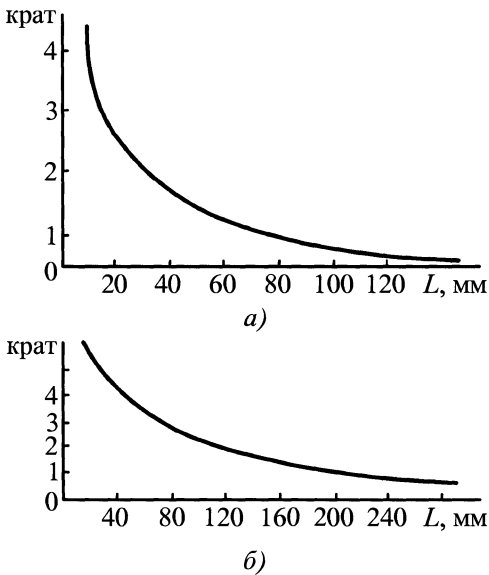


Рис. 4.7. Увеличение в зависимости от расстояния L между объектом и объективом:

a – эндоскоп для малых и средних диаметров;
б – эндоскоп для средних и больших диаметров

ческой трубой вынимают из трубы корпуса, а на их место вставляют микроскопическую систему со своим кварцевым стержнем.

Для освещения поля зрения системы последний стержень имеет окно для вывода пучка подсвечивающего света.

Выпускаются эндоскопы с особой системой подсветки, отличающиеся от основной модели прибора только головкой с ртутной лампой высокого давления на 200 Вт, которая присоединяется к стандартному эндоскопу через переходный штуцер.

Для прогрева лампы до полной яркости требуется не менее 5 мин. Прибор предназначен для флуоресцентной дефектоскопии (диагностики) закатов, волосовин, усталостных трещин и прочих дефектов в ультрафиолетовом свете.

При подборе эндоскопа необходимо учесть, что увеличение контролируемого

участка на наблюдаемой поверхности в значительной степени зависит от расстояния между объектами и объективом. На рис. 4.7 показаны увеличения для эндоскопов двух конструкций.

Расстояние, при котором может быть хорошо исследован объект при достаточной яркости изображения, зависит от коэффициента отражения поверхности, длины эндоскопа, типа и увеличения окулярного устройства, типа наблюдения, а также от углового поля зрения (апертурного угла).

Чтобы получить оптимальные результаты при осмотре полостей малых и средних диаметров, нужно выбирать эндоскоп так, чтобы размер проверяемого участка не превышал $2/3$ диаметра телескопической трубы.

Хотя теоретически длина эндоскопа может быть большой, на практике она ограничивается потерями света, которые в основном зависят от диаметра и длины эндоскопа. Поэтому рекомендуется использовать эндоскоп наиболее короткий. Для деталей, имеющих доступ с двух концов, осмотр должен производиться с каждого конца.

Возможность с помощью эндоскопа наблюдать два близко расположенных объекта зависит не только от совершенства конструкции и точности изготовления прибора, но ограничивается также законами оптики. Так как изображение точечного объекта не является точкой, а представляет собой дифракционную картину конечных размеров, возникает необходимость определить условия, при которых два таких изображения могут быть различимы. Это зависит от качества изображения и остроты зрения дефектоскописта.

4.2. КОНТРОЛЬ С ПОМОЩЬЮ ГИБКИХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Возможности технической эндоскопии существенно расширяются благодаря

созданию волоконно-оптических световодов.

Волоконные световоды представляют собой набор тонких стеклянных светопроводящих нитей диаметром 10 ... 20 мкм, собранных в жгут. Каждый элементарный световод покрыт снаружи тонким слоем (1 ... 2 мкм) стекла с более низким показателем преломления.

На границе световод-оболочка происходит полное внутреннее отражение света, входящего в основную нить, что обеспечивает его прохождение по световоду с минимальным ослаблением. При значительных размерах световода количество отражений бывает более 10^6 . Это приводит к ослаблению сигнала, которое связано с длиной световода экспоненциальной зависимостью.

Потери света можно уменьшить, используя волокна типа селфок, в которых оболочка отсутствует, а показатель преломления плавно уменьшается от центра волокна к его периферии. Волоконные устройства переносят изображение, но сами не формируют его. Поэтому для подачи изображения на вход и снятия его с выхода требуются специальные устройства.

Для передачи света между двумя точками, не лежащими на одной прямой, применяются световоды двух типов: гибкий жгут, изготовленный из волокна толщиной 10 ... 200 мкм, и жесткий жгут, согнутый в желаемую конфигурацию.

Гибкий жгут для передачи света или изображения состоит из тонких оптических волокон, уложенных в пучок. Концы жгута собираются в жесткую конструкцию (проклеиваются или спекаются). Такой жгут можно сгибать, скручивать, смещать без ущерба для оптических и механических свойств волокон.

Защищает жгут от повреждений гибкая металлическая или пластмассовая оболочка, надеваемая поверх волокон. Она одновременно ограничивает радиусгиба.

Размеры жгута в сечении могут достигать нескольких сантиметров, а длина элементарного волокна в них – до нескольких метров и более.

Волоконная оптика по сравнению с линзовыми устройствами обладает следующими достоинствами:

1. Большим апертурным числом, вследствие чего размеры оптического устройства значительно уменьшаются и снижаются требования к качеству материала, точности расчета и изготовления, а также к условиям эксплуатации.

2. Более высокой эффективностью передачи лучистой энергии.

3. Минимальным оптическим искажением и более высокой разрешающей способностью, что позволяет получать высокоэффективные преобразователи изображения.

4. Относительной простотой, пригодностью для работы в широких частотных пределах (от субмиллиметровой области СВЧ до ультрафиолетового излучения) и высокой энергетической эффективностью.

Наиболее существенными недостатками волоконной оптики являются:

- 1) Возможность появления "слепых" пятен на выходном торце из-за наличия больших неоднородностей в отдельных волокнах (неодинаковая температура спекания торцев; загрязнение исходных материалов волокон и др.).

- 2) Сложная и дорогостоящая технология изготовления высококачественных тонких волокон и структур из них.

- 3) Значительные потери энергии при применении длинных волокон.

- 4) Необходимость использования специальных устройств для передачи информации на вход (торец) и снятие ее с выхода (торца) волоконной структуры.

В смотровых приборах малого диаметра, имеющих внутреннюю подсветку с помощью малогабаритной лампы накаливания, невозможно сегодня получить хо-

рошее изображение и, следовательно, нельзя обеспечить надежный контроль исследуемой полости. Для устранения этого недостатка изготавливаются эндоскопы с наружной подсветкой, использующие мощные проекционные лампы.

Такая система, смонтированная снаружи волоконного световода, передает "холодный" свет на его противоположный конец, расположенный в исследуемой полости. Наиболее эффективное свечение этого световода происходит перпендикулярно его торцу, т.е. при прямом (торцевом) типе свечения. Обычно такие световоды диаметром 3,5 ... 8 мм изготавливаются на базе жгутов из моноволокна и монтируются совместно со световодами для изображения.

Эти световоды имеют следующие типы свечения и угловые поля подсветки: прямое с углами 80, 55 и 10°; наклонное вперед и боковое с углами 50 ... 55°; наклонное назад с углами 40 ... 45°. В качестве источника света применяют лампы накаливания проекционного типа напряжением 12 В, мощностью 75 и 150 Вт и напряжением 220/110 В, мощностью 250 Вт.

Более тонкие световоды жесткой и гибкой конструкции, предназначенные для тех же целей, имеют диаметр 0,85 ... 5 мм и длину 0,115 ... 1,8 м. Конструктивное оформление световодов зависит от их диаметра.

Наряду со световодами из стекловолокна выпускаются более дешевые световоды с пластмассовыми волокнами. Такое волокно состоит из полиметилметакрилатовой жилы, которая покрыта тонкой полимерной пленкой с более низким коэффициентом преломления.

Выпускаются световоды в форме жгутов с количеством элементарных волокон 16 ... 64 при диаметре волокна 0,25 ... 1 мм. При хорошей обработке торцев на 1 м жгута теряется 25 ... 35 % светового потока. Потери на отражение на каждом из торцев световода зависят от степени по-

лировки и составляют 7 ... 12 %. При применении высокоинтенсивных источников света удается передавать сигнал более чем на 15 м. При повороте радиусгиба световода не должен быть меньше пяти его диаметров. Жгуты рассчитаны для применения при температуре -40 ... +80 °С. Световоды защищены от воздействия химических веществ и влаги оболочкой из полиэтилена.

По сравнению со световодами из стекловолокна основными недостатками световодов с пластмассовыми волокнами являются ограниченный температурный диапазон работы, постепенное ухудшение оптической пропускания и подверженность воздействию различных химических продуктов. Несмотря на эти недостатки, пластмассовые световоды используются для освещения приборных щитков, наблюдения за производственными процессами и передачи сигналов.

Имеются волоконные световоды, пропускающие излучение в ультрафиолетовом и в инфракрасном участках спектра. Световоды из обычного стекла пропускают инфракрасное излучение длиной волны до 1,02 мкм. Отдельные волокна из оптического стекла для этих целей имеют диаметр 10 ... 70 мкм, из органического стекла - 250 мкм. Световоды из оптического стекла выдерживают температурные нагрузки до 300 °С (допустим режим работы при 550 °С для световодов со спеченными торцами).

Для световодов, работающих в инфракрасном диапазоне спектра, используют особые сорта стекол, например лаптановые с оболочкой из силикатного стекла. Кроме того, применяют арсенидные стекла с длиной волны пропускания 4,6 и 6,3 мкм, которые, однако, требуют при изготовлении точного температурного контроля. Для расширения спектрального диапазона разработаны стекла на основе германия-арсенида-теллура и арсенида-селена-теллура.

Основной недостаток световодов для инфракрасного диапазона – большие потери при пропускании.

Когерентные световоды на базе волоконных жгутов широко применяются в тех случаях, когда нужно передать изображение по искривленному пути. При этом выходные параметры передаваемой информации почти не изменяются. Это качество – одно из основных преимуществ, отличающих волоконную оптику от линзовых систем, благодаря которому передача информации намного упрощается и облегчается.

Жгут, снабженный объективом, передает изображение на выходной торец, где оно рассматривается с помощью окулярного устройства. Жгут, завязанный в узел, не теряет способности передавать изображение. В настоящее время делают жгуты с сечением 1 ... 25 мм.

Разрешающая способность жгута зависит от диаметра нити. Например, при передаче дефекта шириной 0,1 мм на входном торце в натуральную величину диаметр нити должен составить менее 0,05 мм. Окуляры в жгуте обычно сменные и имеют увеличение от 0,5 до 2.

В типичных световодах используют волокна диаметром 50 мкм с угловым полем зрения 60° и апертурным числом 0,55 при коэффициентах преломления жилы 1,62 и оболочки 1,52. Жгут имеет два покрытия: внутри – металлическое, снаружи – пластмассовое (поливиниловое). Световод может работать при температурах 15 ... 50°C. Спектральное пропускание жгута практически одинаково на всех длинах волн видимого света (рис. 4.8).

На базе волоконных световодов выпускаются гибкие эндоскопы. Схема работы такого прибора с внешней подсветкой приведена на рис. 4.9. Изображение на входной торце когерентного световода 4 проецируется при помощи оптической системы, состоящей из отклоняющей приз-

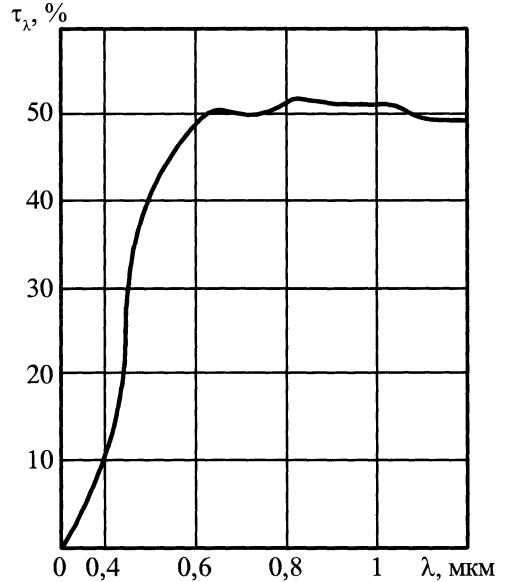


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента τ_λ от λ для жгута длиной 2 м

мы 2 и объектива 3. Проквантованное изображение передается элементарными волокнами световода на его выходной торец, где рассматривается через окуляр 9.

Подсветка контролируемого участка 1 производится внешним источником света 8 и дополнительным некогерентным световодом 7. Весь жгут заключен в корпус 6, центрируемый в проверяемой детали с помощью кольца 5. При необходимости изображение с окуляра может быть спроецировано на пленку фотоприставки 10. Рассмотренный прибор обеспечивает боковое наблюдение контролируемой поверхности.

Существуют и другие типы приборов на базе волоконной оптики, отличающиеся в основном конструкцией объективной части и размещением элементов в системах подсветки и наблюдения.

Фокусировка изображения осуществляется внешней оптической системой за счет перемещения оптического компонента с помощью барабанчика. Приборы представляют собой, как правило, неразборную конструкцию и обеспечивают

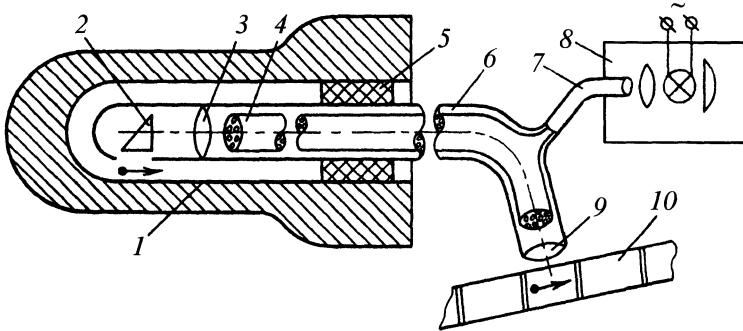


Рис. 4.9. Схема гибкого эндоскопа бокового наблюдения на базе волоконных световодов:

1 – контролируемая поверхность; 2 – отклоняющая призма; 3 – объектив;
4 – когерентный световод; 5 – кольцо; 6 – корпус световода; 7 – некогерентный световод

прямое (при длине объективной части 25 мм) или боковое (при длине объективной части 40 мм) наблюдение. Некоторые модели имеют устройство для дистанционного управления объективной частью с углом гиба $\pm 60^\circ$, включающее штурвал с барабаном у окуляра и гибкую тягу.

Гибкая секция состоит из стеклянных волокон диаметром 15 мкм для изображения и диаметром 50 мкм для подсветки, хлорвиниловой трубки с оплеткой из коррозионно-стойкой стали.

Максимальная глубина наблюдения, достигающая 2 м, определяется общей длиной гибкой и жесткой секции. Объективная часть расположена в жесткой секции.

Наружный источник холодного света, смонтированный с галогенной лампой, проекционного типа, размещен в отдельном блоке. Мощность лампы можно ступенчато регулировать от 10 до 150 Вт. Источник позволяет получать цветные фотографии высокой контрастности.

Серийно выпускаются эндоскопы, отличающиеся от предыдущих приборов тем, что они имеют внутреннюю систему фокусировки и сменные объективы (для прямого и бокового наблюдения). Внешняя система подсветки включает волоконный жгут и источник холодного света с

лампой, напряжение питания которой регулируется с помощью переключателя. Для удобства включение блока производится с помощью ножного выключателя. При сгорании основной лампы резервная быстро вводится в работу путем поворота дискового переключателя с волоконным жгутом на передней панели.

Фокусировка изображения производится ступенчато внутренней оптической системой до ввода прибора в исследуемую зону за счет перемещения оптического компонента установкой барабанчика на соответствующую отметку в объективной части. Таким образом, глубина поля зрения настраивается на ряд со стандартным объективом. Визуальный контроль настройки осуществляется посредством приданной миры.

4.3. ФОТОЭНДОСКОПЫ

Часто требуется зарегистрировать результаты наблюдение с помощью фотокамеры. При достаточном освещении полости, в принципе, каждый эндоскоп может быть соединен с фотокамерой. В зависимости от внутренних габаритов, температуры и состояния среды наблюдаемой полости это можно осуществить в основном фотоэндоскопами трех конструкций.

1. Эндоскоп с наружной фотокамерой, который представляет собой простую и дешевую конструкцию с использованием серийного прибора и съемочного фотоаппарата с ручным управлением, тестируемым на окулярном устройстве. Применяется при исследовании неглубоких (менее 1 м) полостей в коротких и жестких эндоскопах, имеющих малые потери света. Такой эндоскоп удерживается в руках дефектоскописта или устанавливается на штативе (при малых габаритах и небольшой массе прибора), а также подвешивается на верху корпуса камеры.

2. Эндоскоп с внутренней фотокамерой. Это более сложная конструкция, так как используются специальные фотосредства с механическим дистанционным управлением, смонтированные в объективной части серийного смотрового прибора. Применяется, главным образом, при съемке неглубоких (менее 2 м) полостей в гибких эндоскопах, имеющих некоторые потери света.

3. Внутренняя фотокамера без средств наблюдения, которая является весьма сложной и дорогой конструкцией, так как используются специализированные фотосредства с механическим или электрическим дистанционным управлением. Применяется при съемке глубоких (до 500 м) полостей.

Фотозэндоскопы на базе гибких световодов по конструкции осветительной системы бывают двух типов – с внутренней и внешней подсветками.

Фотосъемка при помощи гибких эндоскопов с внутренней подсветкой чаще производится присоединением фотокамеры к окуляру прибора.

Экспозиция кадра зависит от яркости источника света (напряжения лампы), чувствительности и типа пленки.

В настоящее время, как правило, используют внешний цифровой фотоаппарат, соединяемый с окуляром эндоскопа посредством специального оптического адаптера.

4.4. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ЭНДОСКОПЫ

Во многих случаях целесообразно использовать телевизионные системы для улучшения условий контроля и автоматизации обработки данных оптического контроля.

Схема жесткого эндоскопа с передачей данных по телевизионным каналам и выводом на монитор для улучшения условий работы контролера показана на рис. 4.10.

Сменная оптическая система 5 служит для увеличения рабочей длины прибора или подключения телевизионной системы наблюдения, состоящей из видеокамеры 9 и ВКУ 10. Зеркало 11 и объектив 8 предназначены для проектирования изображения поверхности объекта контроля 1 на мишень видеокамеры 9.

Окуляр 6 позволяет наблюдать состояние объекта контроля визуально одновременно с передачей информации через видеокамеру 9.

При телевизионной передаче эндоскоп может быть соединен с телевизионной передающей камерой (ТПК) двумя способами: путем прямого присоединения к окуляру без дополнительных оптических средств с помощью простой муфты, соединяемой одним концом с телевизионной камерой, а другим с окуляром; через переходник с полупрозрачным стеклом, имеющий отводящую трубку с угловым окуляром или параллельным окуляром для контроля изображения во время телевизионной передачи. Размещение ТПК вне исследуемого участка снижает магнитные помехи, возможные при контроле металлических деталей.

Рассмотрим принцип работы телеэндоскопа, смонтированного по второму способу, на примере установки для дефектоскопии труб при боковом наблюдении (рис. 4.11). Установка состоит из участка перемещения с роликами 2, на которых вращается исследуемый объект 3, подсвечиваемый лампой 4; изображение внутрен-

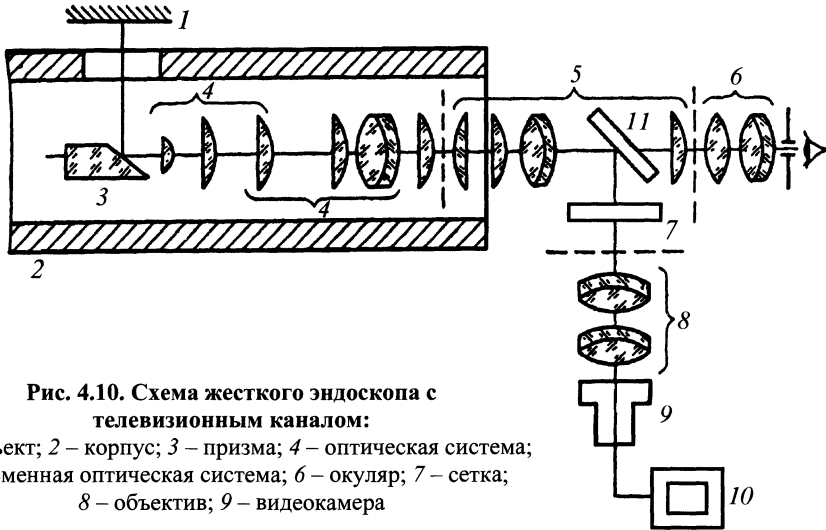


Рис. 4.10. Схема жесткого эндоскопа с телевизионным каналом:

- 1 – объект; 2 – корпус; 3 – призма; 4 – оптическая система;
- 5 – сменная оптическая система; 6 – окуляр; 7 – сетка;
- 8 – объектив; 9 – видеокамера

ренней поверхности через зеркало 5, телескопическую трубу 6 и окуляр 9 проецируется на мишень передающей трубки в ТПК 10, которая закреплена на основании 11. Усиленные импульсы от камеры передаются в блок управления и питания 12 и далее через кабель 13 попадают в видеоприемное устройство (ВПУ) 14, на телевизионном экране которого с большим увеличением изображается поверхность исследуемого

объекта. При необходимости изображение записывается на видеомagneтофон 15. Более тщательно и с большей разрешающей способностью изображение дефекта можно рассмотреть визуально через отклоняющее приспособление с полупрозрачным стеклом 7 и окуляр 8. По мере вращения трубы по стрелке Б и перемещения тележки по стрелке А производится сканирование всей внутренней поверхности.

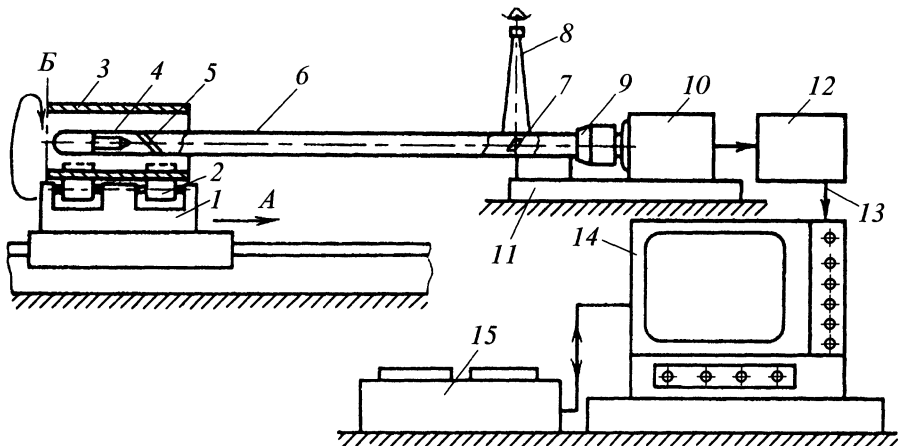


Рис. 4.11. Система для визуальной дефектоскопии труб

Применение телеэндоскопов по сравнению с эндоскопами имеет следующие достоинства:

- удобство работы;
- эндоскопы с рядом ТПК позволяют исследовать изображения от нескольких эндоскопов одновременно и сравнивать их между собой;
- возможность изменения контрастности повышает разрешающую способность контроля;
- электронное изображение позволяет осуществлять автоматизированную дефектоскопию.

Следует отметить, что фото- и телеэндоскопы, применяемые для контроля внутренних поверхностей большой глубины, в 1,5–2 раза короче обычных и имеют от 2 до 5 ламп большой яркости в системе подсветки.

Гибкие эндоскопы фронтального и бокового обзора имеют зонды диаметром от 2 до 120 мм. Универсальность обзора достигается 2- или 4-сторонней артикуляцией конца зонда и сменными оптическими насадками. Оплетка из вольфрама, коррозионно-стойкой стали или ПВХ обеспечивает дополнительную прочность зонда.

Современный гибкий эндоскоп представляет собой сложную систему с большими возможностями. Оптика эндоскопов приспособлена для работы с цифровыми видеокамерами и другими средствами документирования. Рабочая температура от $-23,1$ до $+81,4$ °С; рабочая среда – воздух, вода, масло, бензин, керосин.

Цифровая стереоизмерительная система помимо эндоскопического осмотра и записи изображений позволяет проводить точные измерения дефектов в широком диапазоне ракурсов их наблюдения. При этом намного увеличиваются эффективность и удобство работы контролера-эндоскописта. Четкие изображения с видеоскопа несут максимум информации и обеспечивают высокую точность замеров. Измерительный блок позволяет сохранять результаты на внутреннем диске и смен-

ной дискете и, далее, переносить их на персональный компьютер – в базу данных или для пересылки по электронной почте.

Система позволяет получить высококачественные четкие и яркие цветные изображения. Для достижения максимальной эффективности осмотра предлагается ряд дополнительных функций – полное управление системой с рукоятки видеоскопа, увеличение формата и контрастности изображения в реальном времени, регулировка экспозиции (засветки) и встроенный в рукоятку микрофон для записи речевых комментариев. Все эти функции, равно как и удобная эргономика, увеличивают удобство работы с прибором, позволяют повысить производительность и качество диагностики.

Стереонаблюдение – естественный метод дистанционного определения размеров. Расстояние до объекта и его размеры определяются по смещению изображений, проецируемых правым и левым объективами на матрицу ПЗС. Анализируя взаимное расположение проекций, система решает тригонометрическую задачу и определяет координаты объекта относительно эндоскопа.

Стереоизмерительная система не имеет жестких ограничений по расположению эндоскопа относительно объекта. В отличие от других методов, в которых при замере необходимо строго перпендикулярное наблюдение, данная система работает при любом ракурсе наблюдения, под любым углом к объекту. Это позволяет существенно увеличить точность и упростить процедуру измерений.

Система сама распознает координаты точек, видимых левым и правым объективами. Стереоизмерительная система позволяет определять расстояние между любыми двумя точками на видимой поверхности объекта.

Измерение глубины и высоты дефектов можно проводить как с боковым, так и с торцевым дистальными адаптерами.

Для измерений глубины дефектов в трубах малого диаметра другие методы требуют использования адаптера бокового

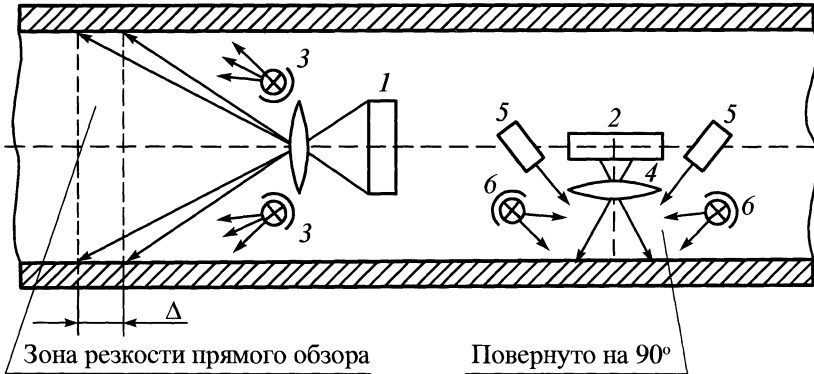


Рис. 4.12. Схема блока телевизионных камер

обзора, что не всегда удобно. Стереοизмерительная система более универсальна. Даже при использовании адаптера прямого обзора диапазон углов наблюдения позволит измерять глубину или высоту дефекта, сохраняя удобство ориентации внутри трубы.

Другой особенностью обычных методов эндоскопических измерений является необходимость наложения различных шкал, сеток и штрихов на изображение дефекта. Эта процедура, требующая незаурядного мастерства и времени, исключена при использовании стереοизмерительной системы.

Измеряется глубина или высота дефекта относительно видимой поверхности объекта.

Измеряется расстояние от указанной линии до точки на поверхности объекта (например – глубина забоин на лопатках ГТД).

Структурная схема видеокроулера состоит из блока телевизионных камер (БТК) с осветителями, соединительного кабеля (длиной до 100 м), блока питания и управления (БПУ), ПЭВМ и полутонного принтера. Предполагается оснащать системы УФ-осветителями для обнаружения люминесцирующих загрязнений и/или дефектов, выявленных методами капиллярной дефектоскопии и другими методами.

Оптическая схема БТК представлена на рис. 4.12. Она включает ТВ-камеру панорамного обзора с широкоугольным объективом 1, фронтальные осветители 3, ТВ-камеру бокового обзора 2 с объективом 4, полосовые осветители 5, расположенные ортогонально относительно плоскости симметрии ТВ-камеры 3 и осветители 6.

Конструкция блока БТК выполнена по модульному принципу, что позволяет быстро адаптировать систему к различным дефектоскопическим ситуациям. Базовый вариант БТК предназначен для работы в нормальных условиях, однако разработаны варианты для работы в сложных условиях (загазованность, пары воды, пожароопасность и т.п.).

Светодиодные осветители 3 с регулируемой яркостью предназначены для подсветки объекта при панорамном обзоре. Отличительной особенностью подсистемы бокового обзора является наличие двух ортогонально расположенных в пространстве полосовых осветителей, формирующих на внутренней поверхности объекта световые линии, проецируемые под углами 45° к нормали для измерения глубины различно ориентированных дефектов методом светового сечения. Общая подсветка объекта при работе камеры бокового обзора осуществляется осветителями 6.

С помощью полосовых осветителей при камере бокового обзора возможно измерение плоскостных размеров (площади, коэффициента формы дефектов, их глубины, а также измерение триангуляционным методом расстояния до объекта). Последнее позволяет, в частности, повысить точность измерения величины дефектов за счет оперативного учета текущего масштаба изображения.

БТК перемещается внутри объекта контроля с помощью средства доставки, изготовляемого обычно пользователем. Таким средством доставки может быть телескопическая штанга или колесная тележка.

Координатное устройство передает непосредственно в компьютер или отображает на собственном дисплее для последующего документирования оператором горизонтальную координату и, в некоторых случаях, угол поворота БТК вокруг своей оси от вертикального положения.

Устройство ввода видеоизображения обеспечивает работу как с цветными, так и с черно-белыми телекамерами. Для работы с цветными ТВ-камерами вместо светодиодных используют осветители с миниатюрными галогенными лампами накаливания (цветовая температура 3200 К).

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

5.1. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

Методы и схемы. Голография является многоступенчатым процессом: регистрируется голограмма объекта, восстанавливается его изображение и далее для получения количественных результатов измерений восстановленное изображение обрабатывается. Способ регистрации голограмм и последующего восстановления изображения объекта основан на интерференции двух волн: исследуемой – отраженной или прошедшей через объект – и когерентной с ней опорной волны с известным распределением фаз. Регистрируемая на фотопластинке интерференционная картина называется *голограммой*. Для восстановления исследуемой волны, формирующей объемное изображение, на голограмму направляется восстанавливающая волна, совпадающая с опорной волной при записи. Восстановленное объемное изображение является точной копией исследуемого объекта и обладает всеми свойствами, присущими оригиналу, например параллаксом и перспективой.

На рис. 5.1 представлены схемы записи и восстановления голограмм. По геометрии падения волн на регистратор голографические схемы можно разделить на однолучевые (схема Габора, рис. 5.2), двухлучевые (схема Лейта и Упатниекса, рис. 5.1, а) и схемы во встречных лучах (схема Денисюка, рис. 5.3).

В однолучевой схеме опорной волны как таковой нет. Она формируется из волны, не претерпевшей рассеяния при прохождении через объект. Поэтому класс объектов, которые можно регистрировать с помощью однолучевой схемы, ограничен.

В двухлучевой схеме и в схеме во встречных лучах сигнальные и опорные

лучи разделены в пространстве и падают на регистратор под разными углами. Эти схемы отличаются друг от друга тем, что в двухлучевой схеме интерферирующие волны падают на регистратор с одной стороны, а в схеме во встречных лучах – с противоположных сторон.

При восстановлении голограммы, записанной по наиболее часто применяемой двухлучевой схеме, образуются два объемных изображения: мнимое и действительное. *Мнимое* изображение, расположенное за голограммой, является точной копией объекта и позволяет производить исследования с помощью традиционных классических оптических методов, например фотографирования, теневых методов и т.д.

Действительное изображение, расположенное перед голограммой, является псевдоскопической (изображение объекта, в котором выпуклые участки объекта наблюдаются как вогнутые и наоборот) копией объекта и кроме исследования традиционными методами допускает исследование с помощью экрана, который располагается в нужном сечении изображения объекта и позволяет получать его голограммы.

В двухлучевой схеме, в отличие от однолучевой, мнимое и действительное изображения и волна нулевого порядка дифракции, возникающие при восстановлении голограммы, разделены в пространстве и не вносят взаимных помех.

Голограммы, полученные по схеме во встречных лучах, обладают рядом особенностей. Избирательность голограммы по отношению к длине волны восстанавливающего излучения позволяет восстанавливать изображение от источника, имеющего сплошной спектр излучения, например, Солнца. Кроме того, голограмма, по-

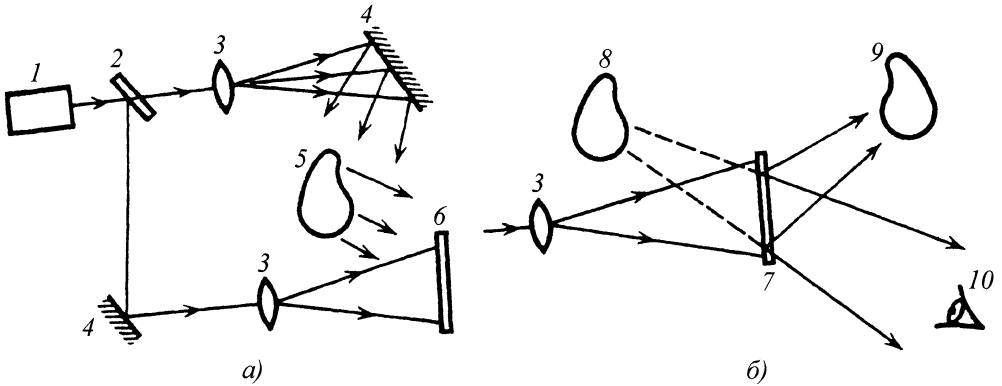


Рис. 5.1. Двухлучевая схема записи (а) и восстановления (б) голограмм:

1 – источник излучения; 2 – светоделитель; 3 – объективы; 4 – отражатели; 5 – исследуемый объект; 6 – голографический регистратор; 7 – голограмма; 8 – мнимое изображение объекта; 9 – действительное изображение объекта; 10 – наблюдатель

лученная по схеме во встречных лучах, при восстановлении мнимого изображения не создает дополнительно волны нулевого порядка и действительного изображения объекта.

Изображенная на рис. 5.1 схема предназначена для регистрации непрозрачных и отражающих объектов; прозрачные объекты регистрируются в проходящем свете. На рис. 5.4 представлена схема регистрации голограмм прозрачных или фазовых объектов (объекты, изменяющие только фазу проходящего волнового фронта и не изменяющие его амплитуду). Для регистрации микрообъектов используется схема, приведенная на рис. 5.5.

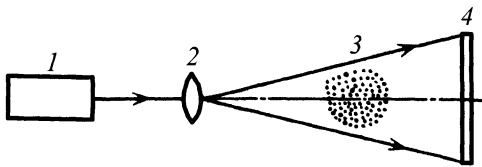


Рис. 5.2. Однолучевая схема регистрации голограмм (схема Габора):

1 – источник излучения; 2 – объектив; 3 – исследуемый объект; 4 – голографический регистратор

При голографировании стационарных объектов интерференционная картина на регистраторе неподвижна, что позволяет использовать для записи голограмм лазеры, работающие в непрерывном режиме. В этом случае время экспозиции определяется только мощностью используемого лазера и чувствительностью фотопластины и может быть достаточно велико.

При голографировании нестационарных объектов интерференционная картина в общем случае перемещается по регистратору; относительной неподвижности интерференционной картины можно достичь, сократив время экспозиции. Данную задачу можно решить, применив импульс-

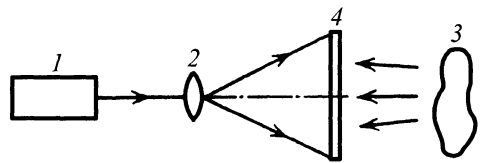


Рис. 5.3. Схема регистрации голограмм во встречных лучах (схема Денисюка):

1 – источник излучения; 2 – объектив; 3 – исследуемый объект; 4 – голографический регистратор

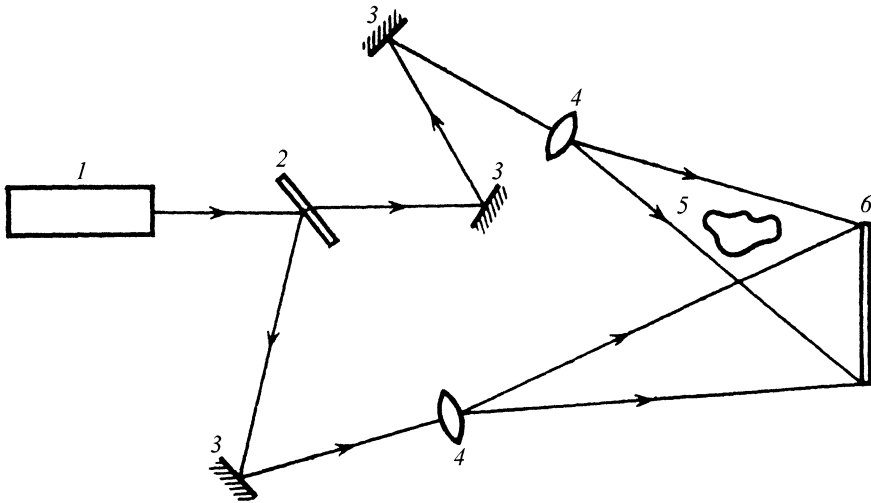


Рис. 5.4. Схема голографической регистрации прозрачных объектов:
 1 – источник излучения; 2 – светоделитель; 3 – отражатели; 4 – объективы;
 5 – исследуемый объект; 6 – голографический регистратор

ное лазерное излучение. Этот метод получил название *импульсной голографии*.

Рассмотренные методы записи и восстановления волнового фронта позволяют выполнять прямые измерения пространственных координат точек на поверхности объекта произвольной формы, его геометрических размеров, изучать форму объек-

тов и рельеф поверхности. Обработав результаты измерений, можно определить различные параметры и характеристики объектов: величину перемещений объекта как целого, параметры двухфазных сред, например коэффициент сплошности, объемную концентрацию, дисперсность, поле скоростей и т.д.

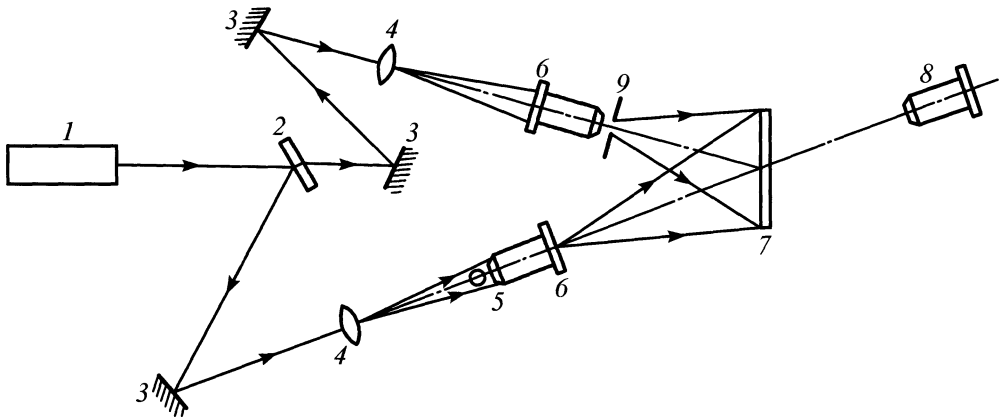


Рис. 5.5. Схема голографической регистрации микрообъектов:
 1 – источник излучения; 2 – светоделитель; 3 – отражатели; 4 – объективы; 5 – исследуемый объект; 6 – микрообъективы; 7 – голографический регистратор; 8 – окуляр; 9 – диафрагма с точечным отверстием

Иначе фиксируется полезная информация методом *голографической интерферометрии*, который в самом общем случае позволяет регистрировать, а следовательно, и осуществлять прямые измерения разности оптических длин интерферирующих волн. В частных случаях это обеспечивает возможность прямых измерений разности геометрических длин и разности показателей преломления с интерференционной точностью (до $\lambda/10$).

Изменение оптических длин может быть вызвано различными факторами: изменением свойств объекта, влияющих на его оптические характеристики (формы, показателя преломления, поляризационных характеристик, положения объекта в пространстве); изменением оптических характеристик среды вокруг объекта (этот случай сводится к первому, так как объектом исследования является окружающая среда); изменением исходных параметров интерферирующих волн (длины волны, направления распространения или формы волновых фронтов, поляризационных характеристик, разности хода).

Перечисленные факторы могут влиять каждый в отдельности либо в произвольной совокупности. Изменения свойств объекта могут быть самопроизвольными, т.е. определяться характером регистрируемого объекта, или преднамеренными, т.е. вносимыми извне, что определяется задачами и целями конкретного исследования. Изменения оптических характеристик среды и исходных параметров интерферирующих волн являются преднамеренными. Здесь не рассматриваются возможные нестабильности параметров источников излучения и нестабильности положений оптических элементов, входящих в голографическую схему. В случае преднамеренных изменений оптических длин волн осуществлять голографическую регистрацию удастся, как правило, только для стационарных и медленно изменяющихся объектов.

Из перечисленных способов изменения оптических длин интерферирующих волн вытекают следующие виды прямых измерений, которые могут быть реализованы с помощью голографической интерферометрии: измерение пространственных координат точек на поверхности объекта, распределения деформаций поверхности объекта, объемного распределения показателя преломления объекта, изменений во времени объемного распределения показателя преломления нестационарного объекта.

Основным методом голографической интерферометрии является *метод двойной экспозиции*, который позволяет сравнивать два состояния объекта, относящиеся к различным моментам времени. По своим применениям этот метод является универсальным. В нем на голограмме с помощью двух экспозиций регистрируются два состояния объекта в различные моменты времени. При восстановлении такой голограммы два изображения объекта интерферируют друг с другом, образуя голографическую интерферограмму. При этом на восстановленном изображении объекта появляются интерференционные полосы, характеризующие изменение объекта между экспозициями. При наблюдении объекта под разными углами интерференционные картины имеют различную структуру, что является существенным при расшифровке интерферограмм неосесимметричных объектов. Интерферограмма, полученная таким образом, называется интерферограммой *в полосах бесконечной ширины*.

Если при регистрации *фазового* объекта перед второй экспозицией каким-либо образом изменить направление сигнала луча на малый угол (измеряемый угловыми минутами), то структура полос интерференционной картины изменится. Возникает система прямых интерференционных полос, искривленных в местах изменения регистрируемого объекта между экспозициями. Период этих полос, на-

зываемых *опорными*, определяется углом поворота сигнального луча и является конечной величиной, чем и объясняется название интерферограмм такого типа – интерферограммы в *полосах конечной ширины*.

Разновидностью метода двойной экспозиции является метод наблюдения интерферограмм *в реальном времени*, при котором осуществляется интерференция волнового фронта от реального объекта с восстановленным с голограммы изображением объекта в начальном состоянии. Изменяющиеся во времени интерференционные картины записываются в этом методе с помощью фото- или киноаппаратуры, что позволяет изучать в динамике различные нестационарные процессы (с одного ракурса).

Другие методы, использующие принципы голографической интерферометрии, не обладают такой общностью и имеют более узкие области применения.

Методом усреднения осуществляется голографическая регистрация нестационарных объектов при длительности экспозиции, многократно превышающей период релаксации объекта. При восстановлении полученной таким образом голограммы возникает интерференция множества незначительно отличающихся друг от друга изображений, которые имели место при записи голограммы в различные моменты времени в течение экспозиции. Это приводит к уменьшению видности результирующей интерференционной картины.

Метод имеет практическое значение лишь при малых перемещениях точек объекта, так как видность интерференционных полос сильно зависит от перемещений и быстро уменьшается с их ростом. Поэтому метод усреднения более эффективен для изучения вибраций с максимальной амплитудой (5 ... 10)λ. При регистрации вибраций оказываются зарегистрированными только два крайних положения (состояния) объекта, которые и интерферируют между собой при восстановлении,

образуя голографическую интерферограмму. Зависимость видности от величины перемещения позволяет легко выделить нулевую интерференционную полосу, что очень важно при обсчете интерферограмм. Основное достоинство метода усреднения – простота.

Стробоголографический метод пригоден для исследования периодических процессов (вибраций, вращений и т.д.) Этот метод представляет собой аппаратную модификацию метода двойной экспозиции и заключается в последовательной периодической записи на голограмму одной и той же (или одних и тех же) стадии периодического процесса с помощью соответствующим образом промодулированного по интенсивности (практически импульсного) лазерного излучения. По видности зарегистрированной интерференционной картины можно судить о стабильности исследуемого процесса. Это отличительная особенность метода по сравнению с методом двойной экспозиции. Исследуя периодический процесс в реальном времени, можно изучать степень стабильности процесса.

По сравнению с методом усреднения в стробоголографическом методе значительно ослаблено ограничение на перемещения регистрируемого объекта (до традиционных в голографической интерферометрии значений: несколько десятков длин волн).

Название *двухдлинноволновый метод* объединяет методы голографической регистрации с использованием излучения, содержащего две спектральные линии, или с использованием в различных экспозициях излучения с различной длиной волны. Полученные голограммы восстанавливают волной одной длины. Этот метод повышает информативность голографических интерферограмм и позволяет исследовать, например, не только пространственное распределение показателя преломления объекта, но и его дисперсию.

Выбор конкретного метода исследования определяется целями и задачами каждого исследования, т.е. конкретным видом измерений, а выбор оптической схемы и необходимой голографической аппаратуры – характеристиками исследуемого объекта: размером, степенью прозрачности, структурой поверхности, степенью стационарности.

Например, микрообъекты исследуют с помощью голографического микроскопа. Степень прозрачности и структура поверхности – диффузная, зеркальная или комбинированная – исследуемого объекта определяют выбор конкретной оптической схемы голографической регистрации, в проходящем или отраженном свете, с боковой подсветкой. Для регистрации стационарных объектов используется голографическая аппаратура с лазерами, работающими в непрерывном режиме, нестационарных объектов – голографическая аппаратура с импульсными лазерами. Частные виды нестационарных объектов – вибрирующие объекты – можно исследовать с помощью голографической аппаратуры с непрерывными лазерами методами усреднения или стробоголографии.

Перечисленные прямые измерения позволяют в каждом конкретном случае вычислять большое количество параметров и характеристик исследуемых объектов.

Деформации объектов могут быть вызваны механическими нагрузками, нагреванием, изменением давления газа или жидкости в объекте или окружающей среде и т.д. По степени деформации можно определить распределения этих параметров.

От пространственного распределения показателя преломления объекта можно перейти к физическим параметрам, таким как пространственные распределения температур, давлений, напряжений, плотностей, концентраций, в том числе нестационарных.

При изучении динамики двухфазных потоков широкое применение нашел метод *парных импульсов*, который заключается в последовательной регистрации на голограмме нестационарного объекта в двух сильно различающихся положениях, когда восстановленные изображения не дают интерференции.

Классификация голограмм. Голограммы можно классифицировать также по способу формирования предметной и опорной волн и по способу записи интерференционной структуры в регистрирующей среде. Рассмотрим эти типы классификации.

Предметную волну формируют, освещая предмет пучком когерентного света. Рассеянная предметом световая волна, несущая информацию о нем, падает на голограмму. При этом в зависимости от взаимного положения предмета и голограммы, а также наличия оптических элементов между ними связь между амплитудно-фазовым распределением в плоскости голограммы и соответствующим распределением непосредственно за объектом может описываться преобразованиями соответственно Френеля или Фурье.

Если же предмет находится в плоскости голограммы или сфокусирован на нее, то амплитудно-фазовое распределение на голограмме будет тем же, что и в плоскости объекта (рис. 5.6, а). Соответствующие голограммы носят название *голограмм сфокусированного изображения*. В данном случае каждой точке объекта соответствует своя определенная точка (малый участок) голограммы, т.е. осуществляется локальность записи. При этом, например, оказывается несущественным спектральный состав и конфигурация волнового фронта восстанавливающей волны, и потому нет необходимости поддерживать тождественность опорной и восстанавливающей волн.

Когда голограмма находится на бесконечном расстоянии от предмета, т.е. в области дифракции Фраунгофера, она но-

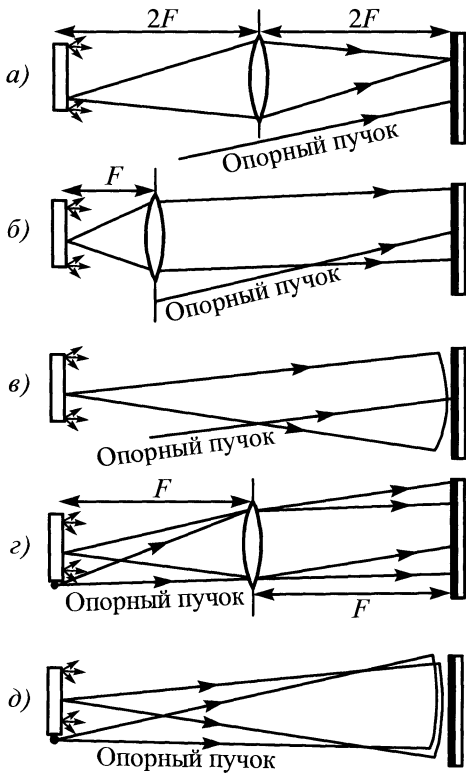


Рис. 5.6. Схема получения голограмм:
 а – фокусированного изображения;
 б – Фраунгофера; в – Френеля; г – Фурье;
 д – "безлинзовая" Фурье

сит название *голограммы Фраунгофера*. В этом случае каждая точка предмета посылает на голограмму параллельный световой пучок, а связь между амплитудно-фазовым распределением предметной волны в плоскости голограммы и в плоскости предмета дается преобразованием Фурье. Для получения такой голограммы предмет должен располагаться достаточно далеко от пластинки либо в фокусе линзы (рис. 5.6, б).

Наиболее общим типом голограмм являются *голограммы Френеля* (рис. 5.6, в). Они образуются в том случае, когда регистрирующий материал располагается в области дифракции ближнего поля (область дифракции Френеля). По мере увеличения расстояния между объектом и

голограммой они переходят в голограммы Фраунгофера, а если это расстояние стремится к нулю, получаем голограммы сфокусированных изображений.

Поскольку на голограмме записывается интерференционная картина, образованная предметной и опорной волнами, для классификации голограмм существенна и форма волнового фронта последней.

Если и предмет, и точечный источник опорной волны расположены на бесконечности, то распределение амплитуд каждой из волн в плоскости голограммы совпадает с Фурье распределением амплитуд соответственно предмета и опорного источника. Такую голограмму называют *голограммой Фурье*. Для получения голограммы Фурье предмет и опорный источник обычно располагают в фокальной плоскости линзы (см рис. 5.6, г).

Другая схема получения голограммы Фурье изображена на рис 5.6, д. В этом случае и предмет, и опорный источник расположены на конечном расстоянии от фотопластинки, однако, поскольку они находятся от нее на одинаковом расстоянии, фронт опорной волны и фронты элементарных волн, рассеянных отдельными точками объекта, имеют одинаковую кривизну. Поэтому структура и свойства такой *"безлинзовой" голограммы Фурье* практически такие же, как у голограммы, полученной по схеме рис. 5.6, г.

Структура объемной интерференционной картины, образующейся при наложении двух сферических волн, представлена на рис. 5.7. Точечный опорный источник O_2 – центр одной из сферических волн и точечный предмет O_1 – центр другой волны. Поверхности максимумов и минимумов в этом случае – система гиперболоидов вращения, сечение которых плоскостью чертежа показано на рис. 5.7.

Пространственная частота ν интерференционной структуры (и ее период d) определяются углом α , под которым сходятся в данной точке световые лучи, исходящие из опорного источника и предмета:

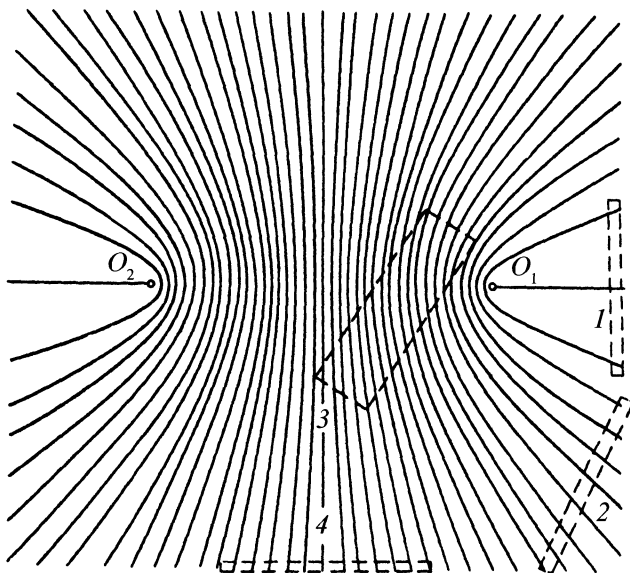


Рис. 5.7. Схема получения голограммы точечного объекта O_1 (O_2 – опорный источник):
 согласно Габору (1); Лейту–Упатниексу с наклонным опорным пучком (2),
 Денисюку (трехмерная голограмма с записью во встречных пучках) (3),
 "безлинзовая" голограмма Фурье (4)

$$v = \frac{1}{d} = 2 \frac{\sin(\alpha/2)}{\lambda}.$$

Ориентация структуры такова, что касательная к поверхности пучностей в каждой точке структуры делит пополам угол α , т.е. содержит биссектрису внутреннего угла между волновыми векторами интерферирующих волн. Волновой вектор по направлению совпадает с направлением распространения волны (для изотропной среды это направление перпендикулярно к поверхности волнового фронта). Абсолютное значение волнового вектора равно $2\pi/\lambda$.

В осевой схеме Габора опорный источник и предмет расположены на оси голограммы. В этом случае угол α близок к нулю и пространственная частота интерференционной структуры минимальная. *Осевые голограммы* иногда называют также *однолучевыми*, поскольку в схеме

Габора используется один пучок света, часть которого, рассеянная предметом, образует предметную волну, а часть исходного пучка, прошедшая через объект без искажения, является опорной волной (см. рис. 5.7 (1)).

Схеме Лейта и Упатниекса с наклонным опорным пучком соответствует положение 2 на рис. 5.7. Обычно в этой схеме когерентный опорный пучок формируется отдельно. Поэтому голограмму, полученную в схеме с наклонным опорным пучком, иногда называют *двухлучевой*. Пространственная частота интерференционной структуры для голограммы с наклонным опорным пучком выше, чем для однолучевых голограмм. Поэтому для регистрации таких голограмм требуются светочувствительные материалы с высоким пространственным разрешением.

Положению 3 на рис. 5.7 соответствует голограмма, полученная *во встречных пучках*. В этом случае опорный и

предметный пучки падают на светочувствительный слой с разных сторон, а угол между ними близок к 180° . Пространственная частота структуры при этом максимальна и близка к $2/\lambda$. При записи голограмм во встречных пучках интерференционные максимумы располагаются вдоль поверхности материала в его толще. Эта схема была впервые предложена Ю.Н. Денисюком. Поскольку при освещении такой голограммы опорным пучком восстановленная предметная волна распространяется навстречу освещающему пучку, их называют также *отражательными*.

На рис. 5.7 изображено также положение 4 фотопластинки при записи "безлинзовой голограммы Фурье".

Проведенная выше классификация относилась только к форме предметной и опорной волн и их взаимной ориентации, что определяет интерференционную структуру голограммы. Голограммы различаются также по способам регистрации этой структуры.

Если толщина светочувствительного слоя много больше расстояния между соседними поверхностями интерференционных максимумов, то голограмму следует рассматривать как объемную или трехмерную. Объемные свойства голограмм особенно четко проявляются в схеме со встречными пучками.

Если же запись голографической структуры происходит не в толще регистрирующего слоя, а на его поверхности или если толщина слоя h достаточно мала по сравнению с расстоянием между соседними элементами структуры d , то такие голограммы называют *двумерными* или *плоскими*. Критерий перехода от двумерных голограмм к трехмерным определяется выражением

$$h \geq 1,6d^2 / \lambda,$$

где λ – длина волны света в регистрирующей среде.

Интерференционная структура может быть зарегистрирована светочувствительным материалом одним из следующих способов:

- в виде вариаций коэффициента пропускания или отражения. Такие голограммы модулируют при восстановлении волнового фронта амплитуду освещающей волны и потому носят название *амплитудных*;

- в виде вариаций толщины или коэффициента преломления. Такие голограммы носят название *фазовых*.

Во многих случаях одновременно осуществляются как фазовая, так и амплитудная модуляции. Например, обычная фотопластинка регистрирует интерференционную структуру в виде вариаций почернения, показателя преломления и рельефа. После отбеливания такой голограммы остается только фазовая модуляция.

Обычно зарегистрированная на голограмме структура сохраняется долго и процесс записи отделен во времени от процесса восстановления волнового фронта. В этом случае голограмму называют *стационарной*. Однако существуют среды (некоторые красители, кристаллы, пары металлов), которые почти безынерционно реагируют своими фазовыми и амплитудными характеристиками на воздействие освещенности. В этом случае голограмма существует только во время воздействия на среду предметной и опорной волн, а восстановление волнового фронта производится одновременно с записью, в результате взаимодействия опорной и предметной волн с образованной ими же структурой голограммы. Такие голограммы называются *динамическими*.

Голограммы, записанные в специальных средах, могут регистрировать и восстанавливать не только амплитуду и фазу, но и поляризационные характеристики волны. В последнее время разработаны также среды и методы, позволяющие производить голографическую запись и восстановление последовательности событий в пикосекундной области.

Основные свойства голограмм:

1. Основное свойство голограммы, отличающее ее от обычной фотографии, заключается в том, что на фотографии регистрируется лишь распределение освещенности в падающей на нее световой волне, в то время как на голограмме регистрируется также распределение фазы предметной волны относительно фазы опорной волны. Информация об амплитуде предметной волны записана на голограмме в виде контраста интерференционной структуры, а о фазе – в виде формы и частоты интерференционных полос. В результате голограмма при освещении ее опорной волной восстанавливает копию предметной волны со всеми амплитудными и фазовыми подробностями.

2. Обычно амплитудные голограммы регистрируют на негативном фотоматериале. При этом свойства голограммы остаются такими же, как и у позитивной: светлым местам объекта соответствуют светлые места восстановленного изображения, а темным – темные. Это свойство голограммы легко понять, принимая во внимание, что информация об амплитуде предметной волны заключена в контрасте интерференционной структуры, распределение которого на голограмме не меняется при замене позитивного процесса на негативный. При такой замене лишь сдвигается на π фаза восстановленной предметной волны, что незаметно при визуальном наблюдении, но проявляется в некоторых экспериментах по голографической интерферометрии.

3. В тех случаях, когда при записи голограмм свет от каждой точки объекта падает на всю поверхность голограммы, каждый малый участок последней способен восстановить все изображение объекта. Конечно, меньший участок голограммы восстановит соответственно меньший участок волнового фронта, несущего информацию об объекте. Если этот участок будет очень мал, то качество восстановленного изображения ухудшится.

В случае голограмм сфокусированного изображения каждая точка объекта посылает свет на соответствующий ей малый участок голограммы. Поэтому фрагмент такой голограммы восстанавливает лишь соответствующий ему участок объекта. Таким же свойством обладают голограммы транспарантов, полученные без рассеивателя.

4. Полный интервал яркостей, передаваемый фотографической пластинкой, как правило, не превышает одного-двух порядков. Между тем реальные объекты часто имеют гораздо большие перепады яркостей. Голограмма, обладая фокусирующими свойствами, использует для построения наиболее ярких участков изображения свет, падающий на всю ее поверхность, и способна передать градации яркости до пяти-шести порядков.

5. Если при восстановлении волнового фронта в качестве освещающего голограмму источника света использовать опорный источник, неизменно ориентированный относительно голограммы, то восстановленное мнимое изображение совпадает по форме и положению с самим предметом. При изменении положения восстанавливающего источника относительно опорного, при изменении его длины волны, а также ориентации голограммы и ее масштабов такое соответствие нарушается. Как правило, такие изменения сопровождаются аберрациями восстановленного изображения.

6. Любое изображение диффузного объекта, полученное в когерентном свете, в том числе и изображение, восстановленное голограммой, обладает хаотической пятнистой структурой, возникающей в результате интерференции световых волн, рассеянных отдельными элементами микроструктуры объекта в пределах пятна, размеры которого определяются дифракционным разрешением оптической системы или голограммы. Это, так называемая, *спекл-структура*. Изображение объекта, таким образом, оказывается состоящим из

отдельных спеклов – сгустков световой энергии сигарообразной формы.

Средний поперечный размер спекла

$$\delta l \approx 1,22\lambda / \alpha ,$$

где α – угловой диаметр голограммы (или линзы, формирующей изображение диффузного объекта в когерентном свете).

Продольный размер спекла существенно больше поперечного:

$$\delta s \approx 4\lambda / \alpha^2 .$$

Спеклы образуются не только в плоскости изображения, но и в любой точке свободного пространства, окружающего диффузный объект, освещенный когерентным светом. В этом случае размеры спеклов также могут быть вычислены по вышеприведенным формулам.

Спеклы, с одной стороны, снижают разрешающую способность голограмм и вообще любых оптических систем, создающих в когерентном свете изображения диффузных (шероховатых) объектов. С другой стороны, имеются многообразные приложения спеклов, многие из которых так же, как и в случае голографической интерферометрии, лежат в области механики деформируемого тела.

7. Предельная разрешающая способность голограммы определяется дифракцией света на ее апертуре и может быть вычислена так же, как и для обычных оптических систем. В соответствии с критерием Рэля угловое разрешение для круглой голограммы с диаметром D

$$\delta \varphi \approx 1,22\lambda / D ,$$

а для квадратной голограммы со стороной l

$$\delta \varphi \approx \lambda / l .$$

На практике обычно ряд причин не позволяет достигнуть предельного разрешения. Одной из причин являются спеклы.

Кроме того, для большинства схем получения голограммы ее предельный размер определяется разрешающей способностью регистрирующего материала, поскольку с ростом размеров голограммы увеличивается угол между предметным и опорным пучками и, следовательно, растет пространственная частота интерференционной структуры. Исключением в этом смысле является схема "безлинзовой" голограммы Фурье (см. рис. 5.6, δ), в которой пространственная частота структуры при увеличении размеров голограммы не увеличивается.

8. Важнейшей характеристикой голограмм, определяющей яркость восстановленного изображения, является *дифракционная эффективность*, равная отношению светового потока в восстановленной волне к световому потоку, падающему на голограмму. Дифракционная эффективность определяется типом голограммы, свойствами регистрирующего материала, а также условиями записи голограммы.

9. Если значения экспозиций в максимумах и минимумах интерференционной структуры существенно выходят за пределы линейного участка зависимости амплитудного пропускания от экспозиции, то регистрация голограмм становится нелинейной. Линейно зарегистрированную голограмму можно сравнить с дифракционной решеткой с синусоидальным распределением амплитудного пропускания, которая, как известно, не образует дифракционных порядков выше первого.

При нелинейной записи голограмма также представляет собой периодическую решетку, однако распределение амплитудного пропускания в этом случае может значительно отличаться от синусоидального. Такая решетка, кроме волн нулевого и первых порядков, дает также волны высших дифракционных порядков. Однако нелинейность записи голограммы проявляется не только в этом, но и в искажении амплитуд восстановливаемых волн первого порядка. Влияние нелинейности на изображение первого порядка сводится к усилению фона, появлению ореолов,

искажению относительных интенсивностей разных точек объекта, а в некоторых случаях и к появлению ложных изображений.

Распределение яркости в этих изображениях, как правило, сильно искажено, а фаза изображения n -го порядка отличается в n раз от фазы изображения первого порядка. Это свойство нелинейно зарегистрированных голограмм находит применение в некоторых методах повышения чувствительности голографической интерферометрии прозрачных фазовых объектов.

10. Особыми свойствами обладают объемные голограммы. Они представляют собой трехмерную структуру, в которой поверхности узлов и пучностей зарегистрированы в виде вариаций показателя преломления или коэффициента отражения среды. Такая структура при освещении ее опорной волной действует подобно трехмерной дифракционной решетке. Свет, зеркально отраженный от слоев, будет восстанавливать волну от предмета. Действительно, поверхности узлов и пучностей (см. выше) направлены по биссектрисе угла, который составляют предметный и опорный пучки, что и обеспечивает это свойство трехмерных голограмм.

Пучки, отраженные от разных слоев, будут усиливать друг друга только в том случае, если они синфазны, т.е. разность хода между ними должна равняться λ . Указанное условие Липпмана–Брэгга будет автоматически выполняться лишь для той длины волны, в которой регистрировалась голограмма. Это приводит к избирательности голограммы по отношению к длине волны источника, в свете которого происходит восстановление волнового фронта. Поэтому появляется возможность восстанавливать изображение с помощью источника сплошного спектра (лампа накаливания, Солнце). Если голограмма экспонировалась в свете нескольких спектральных линий (например, синей, зеленой и красной), то каждая длина волны

образует свою трехмерную структуру. Соответствующие длины волн будут выделяться из сплошного спектра при освещении голограммы, что и приведет к восстановлению не только структуры, но и спектрального состава световой волны, т.е. получению цветного изображения.

Трехмерные голограммы одновременно образуют только одно изображение (мнимое или действительное, в зависимости от способа их освещения) и не дают волны нулевого порядка.

5.2. ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Голографические установки. В настоящее время используемые голографические установки можно разделить на две группы – стационарные лабораторные и специальные, позволяющие проводить исследования на действующем оборудовании или стендах.

Основу стационарной голографической установки составляет виброзащитная плита, на которой собирают оптическую схему и устанавливают исследуемый объект. Плиты голографических установок, на которых решаются задачи механики, как правило, изготавливают из металла с системой отверстий или пазов на рабочей поверхности для крепления элементов схемы и объекта исследования. Наиболее прогрессивной конструкцией плиты является сотовая, сочетающая в себе жесткость, виброустойчивость и малую массу. Такие плиты изготавливают из стали и алюминия длиной 10 метров, что практически невыполнимо при применении любого другого способа изготовления.

Голографической плите необходима виброизоляция. Как уже упоминалось выше, положение полос регистрируемой на голограмме микроструктуры определяется фазами пучков, интерферирующих в плоскости регистрации. Изменение разности фаз пучков на величину порядка π в процессе экспозиции вызывает смазывание микроструктуры и резкую потерю качест-

ва голограммы, вплоть до исчезновения восстановленного изображения. Причиной изменения фазовых соотношений пучков, помимо изменений оптических свойств и положения исследуемого объекта, могут быть смещения и вибрации деталей голографической схемы, возникающие в них при воздействии внешних механических и акустических факторов.

Наличие вибраций в установке может контролироваться с помощью микроскопа от оптической скамьи типа ОСК, помещаемого в области расположения голограммы. Неподвижность структуры полос легко контролировать при совместном наблюдении полос и визирной шкалы. Если полосы смещаются, необходимо проконтролировать механическую стабильность отдельных элементов схемы.

Для устранения влияния вибраций на качество голограмм используются различного типа промышленные амортизаторы, автомобильные и самолетные камеры, резиновые маты и т.п.

Сборка оптических схем для получения голограмм производится с помощью различных зеркал, линз, делителей, объективов и других элементов. Коротко остановимся на некоторых из них.

Отражающая поверхность зеркал должна быть чистой и хорошего качества, чтобы не вводить в волновой фронт дополнительных искажений. На установке необходимо иметь комплект различных сферических и цилиндрических линз с различным фокусным расстоянием, которые используют для освещения исследуемых тел и формирования опорных волн.

В количественных измерениях перемещений использование коллимированного излучения (плоского волнового фронта) часто диктуется соображениями удобства расшифровки голографических интерферграмм.

Устройство коллиматора отличается от традиционного введением в фокус первой линзы точечной диафрагмы. Роль точечной диафрагмы заключается в про-

странственной фильтрации световых волн, дифрагированных на пылинках и неоднородностях в оптическом тракте, предшествующем выходному объективу коллиматора. Поскольку увеличение диаметра пучка в коллиматоре порядка 100, все неоднородности четко визуализируются в виде дифракционных зон, что нарушает пространственную однородность распределения интенсивности в пучках и меняет условия экспонирования голограммы в различных ее точках.

Обычно точечную диафрагму диаметром 20 ... 30 мкм изготавливают из алюминиевой, никелевой или другой фольги толщиной 10 ... 12 мкм и помещают в фокус первой линзы коллиматора (чаще всего микрообъектива). Для точного совмещения диафрагмы с фокальной точкой микрообъектива последний помещают на подвижной опоре, позволяющей перемещать его в направлении оси коллиматора, а диафрагму крепят на двухкоординатном трансляционном столике, позволяющем смещать ее в направлениях, ортогональных оси коллиматора. При правильной юстировке устройства из диафрагмы выходит идеальная сферическая волна, лишенная всяких следов аберраций оптической системы, формирующей пучок, интерференции, вызванной вторичными отражениями, а также дифракции на пылинках и дефектах оптики.

Естественно, что юстировка положения точечного отверстия должна быть произведена тщательно как в продольном, так и в поперечном направлениях. В противном случае большая часть энергии излучения будет задерживаться и не пройдет через отверстие.

Оптимальное соотношение между амплитудами опорной и освещающей объект волн, которое определяется характеристиками светоделиителя, выбирают, исходя из светорассеивающих свойств изучаемого объекта и расстояния от объекта до голограммы. Чем меньше света рассеивается

от объекта в сторону голограммы и чем больше расстояние до голограммы, тем большую часть энергии световой волны необходимо направить светоделителем в тракт предметного пучка.

Обычно в качестве светоделителя используют плоскопараллельные и клиновидные стеклянные пластинки, на одну из граней которых нанесено диэлектрическое или металлическое отражающее покрытие с пропусканием порядка 0,3 ... 0,7. Ясно, однако, что при изменении объектов исследования оптимальный светоделительный элемент должен иметь возможность перестройки, т.е. плавного изменения соотношения амплитуд волн, направляемых в предметный и опорный тракты. На практике удобно в качестве светоделителя использовать стеклянный клин без покрытия, приняв в качестве опорного один из отраженных им пучков. Отношение световых потоков в пучках при этом можно варьировать в широких пределах наклоном светоделительного клина, поскольку, как известно, френелевский коэффициент отражения существенно зависит от угла падения.

В схемах голографических интерферометров широко используют как деление по амплитуде, так и по фронту световой волны. При построении схем многопрограммных интерферометров эти два способа могут применяться одновременно.

Формирование освещающего объекта пучка и опорной волны может производиться с помощью волоконной оптики.

Требования к постоянству температуры, влажности и стабильности элементов установки особенно жестки при получении отражательных трехмерных голограмм. За время экспозиции необходимо стабилизировать относительную влажность воздуха с точностью до долей процента, температуру до сотых долей градуса и тщательно изолировать голографическую установку и особенно фотопластинку от вибраций.

Выпускается ряд универсальных голографических установок. На этих установках можно проводить изучение деформирования объектов как при статическом, так и при динамическом нагружении. Из зарубежных установок следует выделить установки фирм Newport Corporation, Rottencolber Holo System, Labor. dr. Steinbichler.

Специальные голографические установки, которые часто называют голографическими камерами, играют все более важную роль при изучении деформаций элементов конструкций на действующем оборудовании.

В тех случаях, когда имеют место сильные вибрации и другие возмущения в голографических установках, используют импульсные лазеры. Использование двухимпульсных лазеров с регулируемой задержкой между импульсами позволяет регистрировать высококачественные интерферограммы узлов действующего оборудования.

Специально разработанные методы компенсации перемещений исследуемых объектов во время голографирования позволяют использовать в голографических камерах лазеры непрерывного действия. Такие установки, смонтированные на испытательных машинах, дали возможность регистрировать поля перемещений образцов с целью определения механических свойств материалов и изучения концентраций деформаций.

Лазеры. Специфика голографии, как указывалось выше, состоит в том, что особое внимание обращается на когерентные характеристики излучения источника. Излучение должно обладать достаточными:

– временной когерентностью для того, чтобы в плоскости голограммы существовала контрастная интерференционная микроструктура для всех участков объекта независимо от их расстояния до голограммы,

– пространственной когерентностью для того, чтобы предметная волна, рассе-

янная в любую точку голограммы от различных участков исследуемой поверхности, создавала четкую интерференционную микроструктуру с любым элементом волнового фронта опорной волны;

– мощностью, необходимой для того, чтобы зарегистрировать на данном светочувствительном материале интерференционную микроструктуру за время, определяемое стабильностью голографической установки.

Рассмотрение когерентных свойств различных источников показывает, что только лазеры удовлетворяют одновременно всем этим необходимым требованиям.

Не рассматривая принципы действия лазеров, кратко остановимся на когерентных свойствах лазерного излучения.

В лазерном резонаторе устанавливаются поперечные стоячие волны типа ТЕМ (transverse electro-magnetic). Тип колебаний (мода) может быть охарактеризован тремя индексами и обозначается $ТЕМ_{mnp}$.

Первые два индекса (m, n) относятся к распределению полей в плоскости, перпендикулярной к оси резонатора. Моды, различающиеся этими индексами, называются поперечными. Если лазер генерирует только одну из них, то такой режим работы называют *одномодовым*. Количество одновременно возникающих мод определяется конфигурацией резонатора и характером взаимодействия каждой моды с активной средой.

Излучение, соответствующее основной моде низшего порядка – $ТЕМ_{00q}$, концентрируется вблизи оси резонатора. Угловая расходимость излучения для этой моды минимальна и определяется дифракцией. Увеличение числа поперечных мод приводит к увеличению угловой расходимости излучения и эквивалентно увеличению протяженности источника.

Третий индекс q равен числу стоячих волн, укладываемых на длине резонатора. Типы колебаний, различающиеся по этому индексу, называют продольными

или аксиальными модами. Режим, при котором одномодовый лазер генерирует только одну продольную моду, называют *одночастотным*. Индекс q выражается числом много большим, чем m и n , и при обозначениях мод обычно опускается. Очевидно, что длина когерентности максимальна, когда лазер работает в одночастотном режиме.

Недостаточная длина когерентности ограничивает глубину голографической сцены и заставляет принимать меры для выравнивания путей опорного и предметного пучков от точки их разделения до голограммы. В этом случае следует также позаботиться о рациональном расположении объекта относительно источника света и голограммы, так, чтобы путь источник–объект–голограмма для всех точек объекта был примерно одинаков.

В решении большинства практических задач методами голографической интерферометрии используются газовые лазеры, работающие в непрерывном режиме. Этот тип лазеров в настоящее время наиболее распространен в голографии по следующим причинам:

– газовые лазеры многих типов давно освоены промышленностью, они дешевле и доступней, чем другие лазеры;

– эти лазеры обладают достаточно высокой долговечностью при сохранении основных выходных параметров;

– газовые лазеры практически всегда используются для восстановления изображений с голограмм, даже если эти голограммы получены при помощи лазеров других типов, а также для юстировки и настройки схем интерферометров.

По составу рабочей смеси, в которой образуется газовый разряд, газовые лазеры подразделяются на гелий-неоновые (He-Ne), гелий-кадмиевые (He-Cd), аргоновые (Ar), криптоновые (Kr) и др.

Гелий-неоновые лазеры с короткими разрядными трубками (до 50 см) работают практически в одночастотном режиме. Недостаток таких лазеров – малая мощ-

ность излучения (10 ... 15 мВт). Гелий-неоновые лазеры с длиной резонатора около двух метров имеют мощность порядка 50 ... 100 мВт, но длина когерентности их невелика и обычно равна 10 ... 20 см.

В большинстве ионных лазеров, использующих в качестве рабочей среды Ar, Kr или их смесь, предусмотрена возможность установки внутрирезонаторного эталона Фабри-Перо и получения одночастотного режима работы. Длина когерентности в этом случае достигает нескольких метров и выравнивание длин предметного и опорного пучков в этом случае обычно не требуется.

Для исследования быстропротекающих процессов методами голографической интерферометрии наиболее употребительными являются импульсные лазеры, в которых используется твердотельный элемент. Наиболее распространенными в настоящее время являются рубиновые и неодимовые лазеры.

Характеристики импульсного многомодового рубинового лазера, широко используемого в голографических экспериментах и выпускаемого серийно, следующие: длина волны 0,69 мкм, мощность 20 мВт при длительности импульса 20 нс.

К регистрирующим средам голографическая интерферометрия предъявляет требования, которые с точки зрения других областей применения голографии кажутся весьма умеренными; диапазон пространственных частот, передаваемых голограммой, редко превышает 1500 ... 2000 линий/мм (за исключением отражательных голограмм), не очень существенны шумовые характеристики и нелинейные искажения. Поэтому требования к регистрирующим средам сводятся к максимальной чувствительности (на рабочей длине волны лазера) при умеренных значениях разрешающей способности, уровня шума и дифракционной эффективности.

Галогенидосеребряные фотослой (пластинки и пленки) и фототермопласти-

ческие материалы наиболее распространены. Особо следует отметить фотопластинки ПЭ-2 (ПФГ-03) с разрешающей способностью 10^4 мм⁻¹, позволяющие получать отражательные голограммы с высокой дифракционной эффективностью. Фотообработку этих пластинок лучше всего проводить в скоростном проявителе, при этом операция фиксирования не нужна.

Фототермопластические материалы представляют собой твердый раствор абиетиновой кислоты с добавкой сенсбилизатора в аморфной термопластичной полимерной матрице. Разрешающая способность этих материалов обычно не превышает 1000 линий/мм, а чувствительность практически не уступает галогенидосеребряным материалам.

Фототермопластические носители (ФТН) в настоящее время используются при изучении вибраций, рельефа поверхностей и в неразрушающем контроле. При количественной обработке голографических интерферограмм указанные носители можно эффективно использовать только в тех случаях, когда полосы имеют механическую интерпретацию.

Определенные успехи в последнее время достигнуты при использовании в голографии в качестве регистрирующей среды фоторефрактивных кристаллов.

Для регистрации голограмм в технике спекл-интерферометрии применяются стандартные цифровые, фото- и видеокамеры с разрешением порядка 2 ... 5 мегапикселей.

5.3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Общая идея, лежащая в основе голографических методов, давно используется в картографии и заключается в том, что рельеф трехмерного объекта представляется в виде плоского изображения, являющегося голографической картой (голограммой) поверхности объекта. Линии на такой голограмме, называемые линиями

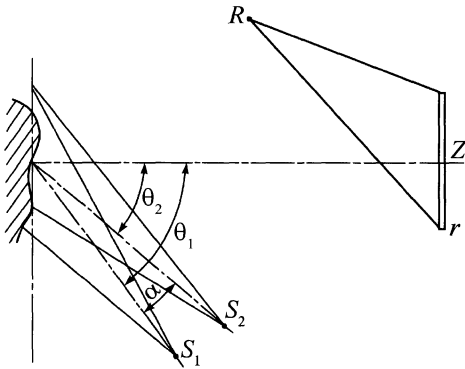


Рис. 5.8. Схема записи голограмм

методом смещенного источника:

R – источник опорного излучения;
 S_1, S_2 – источники освещения объекта

равного уровня, – это следы сечения поверхности объекта равноотстоящими друг от друга плоскостями.

Методы голографической интерферометрии позволяют получать картины интерференционных полос, являющиеся голографическими картами поверхности объектов. Известны три метода получения голографических голограмм: метод смещенного источника, иммерсионный и метод двух длин волн.

Метод смещенного источника. С помощью этого метода получают двухэкспозиционную голограмму исследуемого объекта, причем перед второй экспозицией изменяют положение источника S , освещающего объект (рис. 5.8). Восстановленные с этой голограммы изображения интерферируют между собой вследствие наличия разности фаз для каждой точки поверхности объекта. Разность фаз описывается выражением

$$\Delta\Phi = (2\pi/\lambda)(r_{S1} - r_{S2}),$$

где r_{S1} и r_{S2} – соответственно расстояния от некоторой точки объекта до освещающего источника при первой и второй экспозициях. При $\Delta\Phi = 2\pi N$, где N – число интерференционных полос, получаем

$$r_{S1} - r_{S2} = N\lambda.$$

Если освещающие пучки плоские, то имеет место выражение:

$$z(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) + (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) = N\lambda,$$

где θ_1 и θ_2 – углы между направлением освещающих пучков и осью Z .

В этом случае секущие поверхности – это плоскости, наклонные по отношению к плоскости голограммы. При $\theta_2 = \pi - \theta_1$ угол наклона равен нулю, и получаются "истинные" голографические сечения. Под "истинной" голографией понимается такая, при которой поверхность объекта сечется эквидистантными плоскостями, перпендикулярными к направлению наблюдения. В этом случае

$$2z \cos\theta_1 = N\lambda,$$

откуда расстояние между секущими плоскостями

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2 \cos\theta_1},$$

или

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2 \sin\alpha/2},$$

где α – угол между направлениями освещающих пучков.

Изменяя угол α , можно менять Δh в широких пределах. Например, при $\alpha \approx 1'$, $\Delta h \approx 2,5$ мм, а при $\alpha \approx 3,5^\circ$, $\Delta h \approx 10$ мкм.

При использовании метода смещенного источника из-за бокового освещения образуются тени, вследствие чего нельзя определить рельеф неосвещенных участков поверхности.

Иммерсионный метод. Иммерсионный метод состоит в том, что исследуемый объект помещают в кювету с плоским окном, заполненную прозрачной жидкостью или газом с показателем преломления n_1 , и экспонируют голограмму. Затем изменяют показатель преломления до значения n_2 и вторично экспонируют голограмму. При восстановлении образуются два изображения, интерференция которых дает голографические полосы.

В общем случае характер сечений определяется не только разностью показателей преломления $n_2 - n_1$, но и геометрией схемы, в том числе положением источника освещения, точкой наблюдения, рас-

стоянием окна иммерсионной кюветы от объекта, толщиной окна кюветы. Секущие поверхности являются криволинейными и только при определенных условиях их можно считать плоскостями. Так как требование плоскостности секущих поверхностей является одним из основных в голографии, то рассмотрим подробнее случаи, когда оно выполняется.

При нормальном относительно окна кюветы освещении и наблюдении получаем

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2\Delta n},$$

где Δh – шаг между секущими плоскостями.

В этом случае текущие поверхности являются плоскостями и ориентированы перпендикулярно к направлению наблюдения, а шаг между ними определяется только разностью показателей преломления.

Изменить показатель преломления можно тремя способами:

1. Заменить вещество, заполняющее кювету, с показателем преломления n_1 другим веществом с показателем преломления n_2 , при этом

$$\Delta n = |n_2 - n_1|.$$

2. Ввести в исходную среду с показателем преломления n_1 добавку с показателем преломления n_d . В этом случае показатель преломления смеси

$$n_2 = n_1 + C(n_d - n_1),$$

где C – концентрация добавки в смеси, откуда

$$\Delta n = |C(n_d - n_1)|.$$

3. Воздействовать на исходную среду с показателем преломления n_1 , изменяя ее температуру или давление.

Целесообразнее применять первый способ, так как он более оперативен и позволяет многократно использовать обе иммерсионные среды. При третьем способе могут возникать значительные погрешности в результатах измерений из-за деформации объекта и окна кювета под воздействием температурных перепадов или давления заполняющего газа. Этот способ применяют только для голографии с большим шагом.

Подбором пар иммерсионных сред можно получить голограммы объектов сложной формы с шагом секущих плоскостей Δh от единиц микрометров до нескольких миллиметров. Например, пара азот–углекислый газ обеспечивает $\Delta h = 2$ мм, пара вода–глицерин – $\Delta h = 2,32$ мкм. Минимальные значения Δh получают при использовании пары газ–жидкость. Так, пара азот–вода дает $\Delta h = 0,95$ мкм.

При подборе сред разность показателей преломления измеряют интерференционными рефрактометрами.

Применяя иммерсионный метод на практике, используют дешевые нетоксичные иммерсионные среды. В качестве пары иммерсионных жидкостей рекомендуются дистиллированная вода и водный раствор поваренной соли.

Иммерсионная жидкость с требуемым показателем преломления готовится добавлением в дистиллированную воду соляного раствора с измеренным показателем преломления n_d . Концентрация соляного раствора должна быть

$$C = \frac{n_2 - n_1}{n_d - n_1}.$$

Значения Δh и соответствующие им разности показателей преломления Δn иммерсионных жидкостей следующие:

Δh , мкм	1000	750	500	250	100	75	50	25	10
$\Delta n \cdot 10^3$	0,3164	0,4218	0,6328	1,2656	3,164	4,218	6,328	12,656	31,64

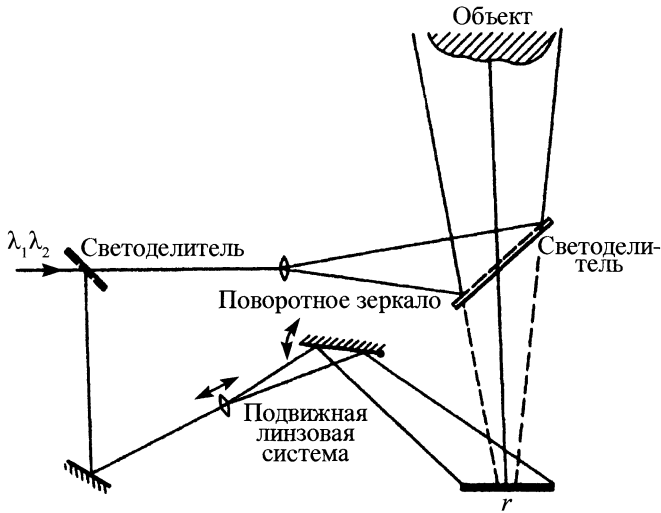


Рис. 5.9. Схема получения голограмм методом двух длин

Преимущество иммерсионного метода следующие:

1) метод достаточно хорошо отработан и может быть реализован на обычной голографической установке с применением серийного гелий-неонового лазера;

2) при использовании метода обеспечивается широкий диапазон значений шага интерференционных полос ($\Delta h = 10 \dots 10\,000$ мкм), значение которого можно задавать с хорошей точностью;

3) этим методом можно исследовать объекты со сложной формой поверхности, так как отсутствуют теневые эффекты.

К недостаткам метода следует отнести:

1) необходимость помещения исследуемого объекта в кювету с иммерсионной средой, что приводит к усложнению эксперимента и ограничению размеров объекта;

2) наличие пристеночных пузырей и различных неоднородностей иммерсионной среды ввиду образования у поверхности объекта пограничного слоя, что сильно искажает картину голографических полос. Эти явления трудно учесть. Особенно сильно они проявляются при получении голограмм с малыми Δh .

Метод двух длин волн. Суть метода двух длин волн заключается в том, что на одну фотопластинку записывают две голограммы одного и того же объекта, причем одну – при использовании длины волны λ_1 , а другую – λ_2 . Восстанавливая изображение источником с одной длиной волны (λ_1 или λ_2), получают два изображения, которые интерferируют, образуя голографическую картину поверхности объекта (рис. 5.9).

Для определения разности фаз восстановленных изображений в первом приближении имеем следующее выражение:

$$\Delta\Phi = (r_s + r_n)(k_1 - k_2) - (k_1 r_{r1} - k_2 r_{r2}),$$

где r_s – расстояние от объекта до источника освещения; r_n – расстояние от объекта до точки наблюдения; r_{r1} и r_{r2} – расстояния от голограммы до источников с длиной волны λ_1 и λ_2 соответственно. Уравнение, описывающее интерференционные полосы, имеет вид

$$(k_1 - k_2)(r_s + r_n) - (k_1 r_{r1} - k_2 r_{r2}) = 2\pi N.$$

Однако при получении голограмм методом двух длин волн возникли серьезные затруднения. Оказалось, что изобра-

жения объекта, записанные в двух длинах волн, а затем восстановленные в одной длине волны, имеют различный масштаб и смещены относительно друг друга. Это приводит по мере уменьшения Δh к размытию интерференционных полос, вплоть до полного их исчезновения. Практически полосы исчезают при $\Delta h = 0,5 \dots 0,8$ мм. Для устранения этих явлений была использована схема компенсации.

При этом уравнение для секущих поверхностей принимает вид

$$\Delta k(r_s + r_n) = 2\pi N.$$

Это соотношение описывает семейство эллипсоидов с фокусами, расположенными в точках наблюдения и освещения. При $(r_s - r_n) \ll A$, где A – расстояние от объекта до голограммы, секущие поверхности в первом приближении можно считать сферами, расстояние между которыми

$$\Delta h = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|}.$$

Практическая реализация метода в значительной степени определяется выбором источника излучения. Лазер, используемый в методе двух длин волн, должен генерировать как минимум две длины волны, отличающиеся между собой на $\Delta\lambda$. Чем шире диапазон значений $\Delta\lambda$ позволяет получить лазер, тем больше выбор значений Δh . С помощью двухчастотного гелий-неонового лазера получены голограммы с $\Delta h = 9$ мкм. Но малая выходная мощность и излучение только одной пары длин волн предопределили практическую нецелесообразность использования этого лазера. Применяя импульсный рубиновый лазер с внутриврезонаторным эталоном Фабри–Перо, можно получить несколько эквидистантных длин волн с разностью $\Delta\lambda = \lambda^2/(2dn)$, где d – толщина эталона, n – показатель преломления материала эталона. Шаг сечений при этом равен оптической толщине эталона $\Delta h = dn$.

Ввиду трудностей в изготовлении качественных эталонов с толщинами меньше 3 ... 5 мм с помощью рубиновых лазеров можно получать только грубые голограммы с $\Delta h \geq 5$ мм.

Применение импульсного лазера позволяет получать голограммы объектов в динамике. Это существенно расширяет возможности метода.

Наиболее подходящими лазерами для использования метода двух длин волн являются перестраиваемые по частоте лазеры на химических красителях и многочастотные ионные лазеры на инертных газах.

Лазеры на красителях с внутриврезонаторным эталоном позволяют получить излучение нескольких эквидистантных длин волн, как и в рубиновом лазере. В первых экспериментах для получения голограмм использовался импульсный лазер на красителях с ламповой накачкой и внутриврезонаторным эталоном Фабри–Перо толщиной $d = 6,35$ мм. С помощью этого лазера были получены голограммы с $\Delta h = 9,5$ мм.

Лазер на красителях непрерывного действия с накачкой от аргонового лазера и выходной мощностью 10 ... 100 мВт позволяет получать голограммы объектов с $\Delta h = 1,5$ и 3,7 мм.

Применение лазеров на красителях целесообразно в грубой голографии с $\Delta h > 1,5 \dots 2,0$ мм.

В настоящее время наиболее подходящим для использования в голографии является ионный лазер, позволяющий получать дискретный набор частот.

Метод двух длин волн для получения голограмм обладает рядом преимуществ:

- 1) большой диапазон шагов сечений;
- 2) высокая точность задания шагов сечений, определяемая разностью длин волн;
- 3) отсутствие различных ограничений на исследуемый объект;
- 4) возможность получения голограмм движущихся объектов.

Тем не менее, метод не получил должного распространения. В частности, это связано с тем, что при его реализации выявляется ряд сложностей, а именно:

- 1) необходимость компенсации углового положения опорного пучка;
- 2) необходимость учета хроматических aberrаций и их устранение;
- 3) зависимость характера сечений от параметров оптической схемы;
- 4) проблема локализации полос.

Но эти трудности принципиально разрешимы и не являются решающими.

Спекл-интерферометрия. Если осветить диффузно-отражающий объект когерентным пучком света, то на поверхности объекта образуется зернистая структура, которая отражает микрорельеф этой поверхности. Размеры отдельных зерен неразличимы невооруженным глазом и могут быть определены по формуле: $D_3 \approx 1,2\lambda A$, где A – апертура линзы, дающей изображение. Так, для аргонового лазера с длиной волны 0,5145 мкм и апертуры, равной 4, получим зерно размером 2,5 мкм.

Для получения спекл-интерферограммы на одну и ту же фотопластинку камеры 4 регистрируют два изображения объекта исследования, характеризующих исходное и деформированное состояния (рис. 5.10). После фотохимической обработки на такой фотопластинке будет зарегистрировано негативное изображение предмета со сложной интерференционной микроструктурой, что придает ей свойства голограммы. Распределение интенсивности света в такой микроструктуре связано с изменением взаимного положения отдельных зерен между двумя экспозициями. Поскольку размеры зерен очень малы и расположены хаотически, то они образуют нерегулярную дифракционную решетку. В механике сплошных сред перемещения считают гладкими непрерывными функциями, и поэтому при рассмотрении достаточно малой области поверхности шаг дифракционной решетки можно

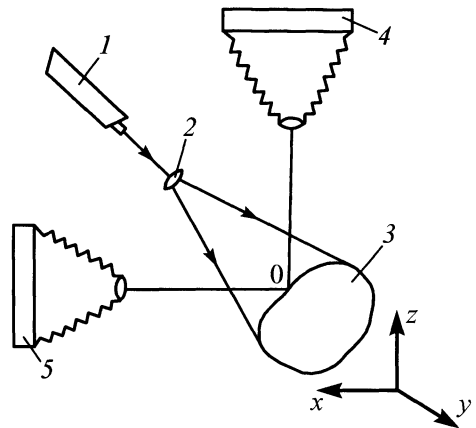


Рис. 5.10. Схема регистрации спекл-интерферограмм:

1 – лазер; 2 – линза; 3 – объект;
4, 5 – фотокамеры

принять постоянным и равным смещению зерен.

Если осветить полученное изображение неразведенным лазерным лучом, то на экране будем наблюдать систему параллельных интерференционных полос (рис. 5.11), шаг которых определяют по формуле

$$\Delta h = \frac{\lambda L}{M|\vec{S}|},$$

где L – расстояние от голограммы до экрана; M – масштаб изображения объекта, \vec{S} – вектор перемещения зерна. Таким образом, измеряя шаг полос, можно определить величину перемещения любой точки объекта, причем направление перемещения будет перпендикулярно интерференционным полосам. Компоненты полного вектора перемещений \vec{S} в декартовой системе координат будут равны $u = S \sin \beta$, $v = S \cos \beta$, где β – угол наклона интерференционных полос к горизонтالي. Горизонтальное и вертикальное перемещения можно также определить, измеряя расстояния Δh_x и Δh_y между соседними интерференционными полосами вдоль осей x и y :

$$u = \lambda L / M \Delta h_x, \quad v = \lambda L / M \Delta h_y.$$

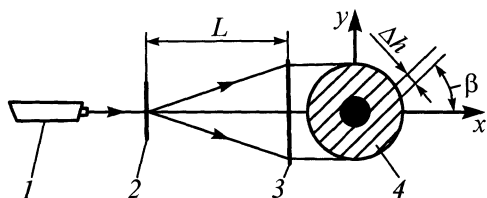


Рис. 5.11. Схема получения интерференционных полос с помощью неразведенного лазерного луча:

1 – лазер; 2 – спекл-интерферограмма; 3 – экран; 4 – картина полос на экране

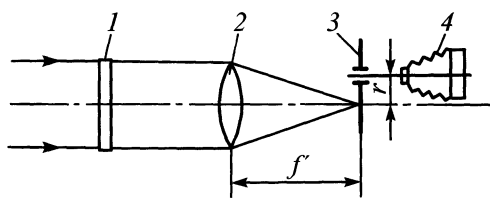


Рис. 5.12. Схема получения интерференционных полос способом пространственной фильтрации:

1 – спекл-интерферограмма; 2 – линза; 3 – пространственный фильтр; 4 – фотокамера

Сканируя голограмму по всему полю, можно получить перемещения во всех точках.

Другим способом определения перемещений является метод пространственной фильтрации (рис. 5.12). Параллельный когерентный пучок света, пройдя через спекл-интерферограмму, попадает на линзу, в фокальной плоскости которой установлена точечная диафрагма. На экране, размещенном за диафрагмой, наблюдается картина интерференционных полос, каждая из которых будет соответствовать проекции вектора перемещения на линию, соединяющую центр диафрагмы с осью оптической системы.

Для получения трех компонент вектора перемещений необходимо получить две спекл-интерферограммы, используя две фотокамеры. Если камеры расположены так, как показано на рис. 5.10, то по интерферограмме, полученной с помощью камеры 4, можно определить перемещения u и v , а по другой интерферограмме (камера 5) – v и w . Значения перемещения v , вычисленные по обеим интерферограммам, могут служить мерой точности полученных результатов.

Спекл-интерферометрию успешно используют также для анализа вибраций. Для наблюдения форм колебаний диффузно-отражающих объектов луч лазера разделяют на предметный и опорный, которые образуют видимую зернистую карти-

ну на изображении поверхности. Вибрации объекта вызывают размывание зерен в районах пучностей и остаются отчетливыми в узлах. Результирующая картина ясно указывает узловые линии или области данной формы колебаний. В отличие от метода реального времени спекл-интерферометрия не требует долговременной стабильности объекта и обеспечивает более яркое изображение. Это используют для быстрого и достаточно точного налаживания экспериментальной оснастки (для расположения фиксаторов объекта в узловых точках, настройки возбудителей колебаний и т.п.).

Если фотокамеру сфокусировать на точечный источник лазерного излучения, которым освещается объект, то на спекл-интерферограмме будут зарегистрированы только перемещения, вызванные жестким поворотом объекта.

Достоинством метода спекл-интерферометрии является то, что он позволяет измерять перемещения от нескольких микрометров до нескольких миллиметров и не предъявляет жестких требований к виброзащите.

В спекл-интерферометрии можно выделить два основных метода. Первый из них, спекл-фотография, заключается в двукратном фотографировании исследуемого объекта в лазерном свете. При этом на фотографии за счет наличия тонкой структуры спеклов регистрируется поле

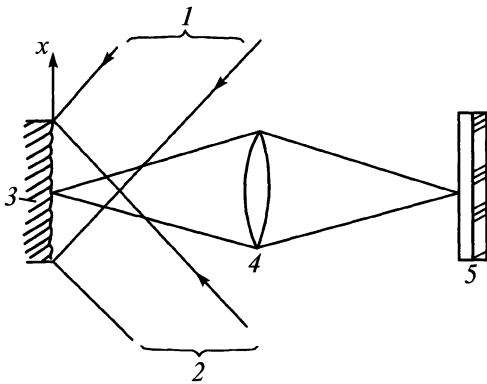


Рис. 5.13. Схема спекл-интерферометрии с двумя освещающими пучками:

1, 2 – освещающие пучки; 3 – объект;
4 – объектив; 5 – фотопластинка

перемещений, происшедших в промежутке времени между двумя экспозициями. Главное преимущество метода состоит в простоте оптической схемы и относительной легкости представления и интерпретации результатов. Требования к механической стабильности значительно менее жесткие, чем при голографической интерферометрии.

Чтобы измерить плоское перемещение объекта, фотопластину экспонируют дважды – один раз до перемещения и один раз после него. Если предположить, что смещение L превышает размер спеклов b_s ($b_s \cong 1,22\lambda_i/D$; λ_i – расстояние от линзы до изображения; D – диаметр линзы), то на проявленной фотопластинке получается фотография пары идентичных спекл-картин, смещенных на расстояние ML . Здесь M – поперечное увеличение оптической системы. Расстояние ML для каждой пары спеклов можно непосредственно измерить путем микроскопического исследования пластинки. Альтернативным способом является когерентно-оптическая обработка фотоснимка, в результате которой смещение может быть представлено в виде картины интерференционных полос.

Метод спекл-фотографии, сохраняя основные достоинства голографической интерферометрии (большой объем ин-

формации, исследование оптически грубых поверхностей, отсутствие контакта с исследуемым объектом), значительно проще в методическом отношении, поскольку не требует сложного специального оборудования. Снижены требования к виброзащите оптических элементов, разрешающей способности фотоматериалов, когерентности лазерного излучения. При несколько меньшей, чем в голографии, чувствительности измерения диапазон измеряемых перемещений расширен – он зависит от масштаба фотографирования и составляет от десятых долей микрометра до одного миллиметра.

Однако область применения спекл-фотографии ограничена исследованием перемещений только на плоской поверхности и регистрацией лишь двух из трех проекций перемещений, перпендикулярных к направлению фотографирования.

Второй метод спекл-интерферометрии получил название корреляционной спекл-интерферометрии. В основу метода также положено фотографирование (или видеозапись) объекта при лазерном освещении. Однако в плоскости изображения в отличие от спекл-фотографии накладываются две когерентные волны. В зависимости от используемой схемы эти две волны могут быть получены путем двунаправленного освещения объекта. Оптическая схема показана на рис. 5.13.

В другом способе используется наложение двух сдвинутых относительно друг друга изображений объекта. Схема приведена на рис. 5.14.

В обоих вариантах интерферирующие в плоскости изображения волны обладают спекл-структурой. Вид суммарной спекл-структуры будет зависеть от соотношения начальных фаз интерферирующих волн. Если плавно менять начальную фазу одной из волн, то спекл-структура начнет изменяться и станет полностью некоррелированной по отношению к первоначальной структуре при изменении

фазы на величину π . При дальнейшем изменении фазы до 2π спекл-структура восстановит первоначальный вид.

Таким образом, по степени корреляции начальной и измененной спекл-структур можно измерять изменение соотношения фаз интерферирующих полей.

В схеме, изображенной на рис. 5.13, соотношение фаз двух волн, приходящих в плоскость изображения, изменяется при перемещении объекта вдоль оси X (длина пути одной из волн увеличивается, а другой – уменьшается). Эту оптическую схему используют для исследования перемещений в плоскости объекта.

В схеме рис. 5.14 в каждую точку плоскости изображения приходят волны, рассеянные двумя различными точками объекта. Соотношение фаз этих волн не меняется при параллельном переносе объекта, так как длины их путей меняются одинаково. Деформация же объекта приводит к изменению фаз интерферирующих волн на различную величину и вызывает соответствующие изменения в спекл-структуре изображения объекта. Эта схема позволяет применять методы интерферометрии сдвига к диффузно-отражающим объектам, что принципиально неосуществимо ни в классической, ни в голографической интерферометрии.

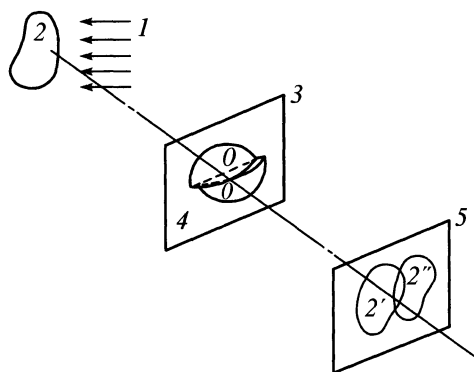


Рис. 5.14. Схема корреляционной спекл-интерферометрии:

1 – освещающая волна; 2 – объект; 3 – экран с двумя отверстиями; 4 – билинза со смещенными друг относительно друга половинами; 5 – регистрирующий материал; 2 и 2'' – сдвинутые друг относительно друга изображения объекта

Корреляционную спекл-интерферометрию можно осуществить также лишь с одной объектной волной (рис. 5.15), заменив вторую на опорную волну, распространяющуюся по оси оптической системы. В этой схеме изменение соотношения фаз интерферирующих волн происходит при перемещении объекта по нормали к его поверхности.

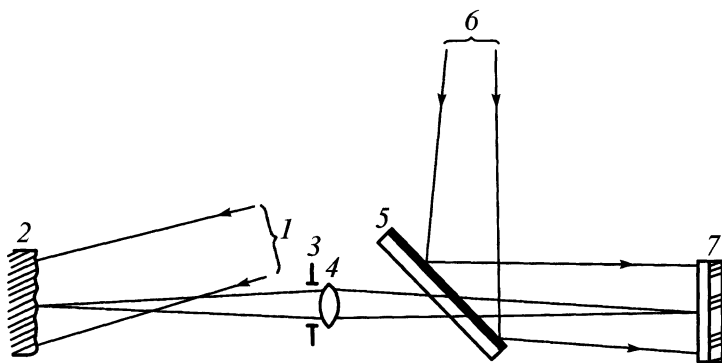


Рис. 5.15. Схема спекл-интерферометрии с одной объектной волной:

1 – освещающий пучок; 2 – объект; 3 – диафрагма; 4 – объектив; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – опорный пучок; 7 – фотопластинка

Взаимное изменение фаз волновых полей в плоскости изображения, как указано выше, оценивают по степени корреляции начальной (до формирования объекта) и измененной (после деформирования) спекл-структур. Это осуществляют, например, вычитанием распределения интенсивности света в измененной спекл-структуре из распределения его интенсивности в начальной структуре. В результате области изображения, в которых начальная и измененная спекл-структуры коррелированы, будут выглядеть темными, а области, где их корреляция отсутствует, – светлыми.

Указанное вычитание интенсивностей может быть осуществлено различными способами. Например, Стетсоном было предложено в промежутке времени между двумя экспозициями фотопластинку или изображение смещать на небольшое расстояние, что позволяет при наблюдении этой спекл-фотографии подобрать такой угол, под которым волны, дифрагированные на исходной и смещенной спекл-структурах, наложатся в противофазе и погасят друг друга, т.е. фотография будет выглядеть темной. Если в промежутке между двумя экспозициями объект был деформирован, на фотографии появятся области, где в соответствии с вышеизложенным спекл-структура, зарегистрированная при второй экспозиции, будет некоррелированная с исходной спекл-структурой. В результате волны, дифрагированные на исходной и измененной спекл-структурах, не смогут взаимно погасить друг друга из-за того, что разность фаз этих волн случайно меняется от точки к точке. Таким образом, области корреляции исходной и измененной спекл-структур будут выглядеть темными, а области отсутствия корреляции – светлыми. Существует и ряд других оптических методов "проявления" картины корреляции спекл-структур.

Интересные возможности открывает использование видеозаписи спекл-струк-

тур, что, во-первых, позволяет исключить весьма продолжительный процесс фотообработки регистрирующих материалов, а, во-вторых, – осуществить с помощью электронной схемы вычитание двух спекл-структур, соответствующих различным состояниям объекта, а также отфильтровать разностный сигнал с целью повышения контраста картины корреляции спекл-структур.

Телевизионная спекл-интерферометрия. В случаях, когда необходим непрерывный контроль в промышленных условиях, представляется естественным исследовать возможность замены фотографической регистрации на регистрацию с помощью телевизионных систем. К сожалению, почти мгновенная обработка при использовании телевизионных систем достигается за счет резкого снижения разрешающей способности. Она уменьшается от значений более 1000 линий на 1 мм для голографических эмульсий, до типичных значений 500 разрешимых элементов на строку телевизионного изображения. Из-за столь низкой разрешающей способности практически исключается возможность применения трехмерной голографической интерферометрии. Однако телевизионные системы можно использовать в спекл-фотографии и спекл-интерферометрии, в методе проекции полос, а также в не требующей высокого разрешения голографической интерферометрии сфокусированных изображений. Фактически различие между методами, использующими спеклы, и голографическими методами не всегда очевидно, если используются телевизионные системы.

Рассмотрим *метод временного промежутка*, эквивалентный методу двух экспозиций в обычной и спекл-интерферометрии. На рис. 5.16 представлена схема для измерений *нормальных деформаций* или наклона. Оптическая часть схемы представляет собой спекл-интерферометр. Апертуру объектива диафрагмируют до тех пор, пока картина спеклов не будет разрешаться телевизионной камерой. Чтобы уменьшить простран-

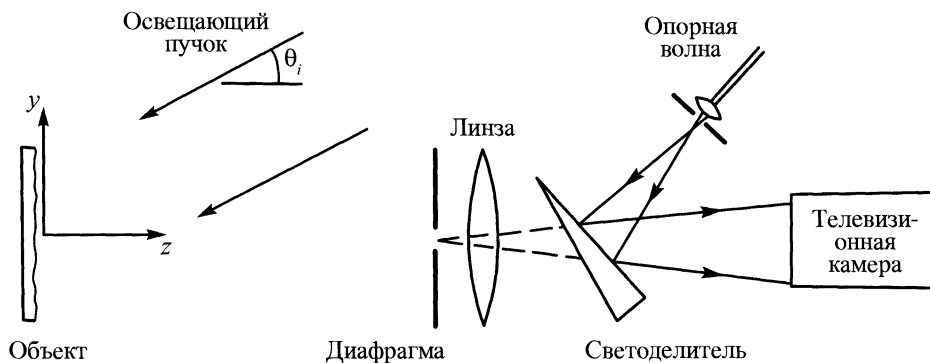


Рис. 5.16. Схема измерения нормальных деформаций или наклона методом спекл-интерферометрии с электронной обработкой сигнала и телевизионным воспроизведением картины

ственную частоту спеклов, используется сферическая опорная волна, которая исходит из мнимого точечного источника, находящегося в центре диафрагмы. Если участок поверхности объекта сместится в направлении нормали на расстояние

$$\Delta z = \frac{(N + 1/2)\lambda}{1 + \cos \theta_i},$$

где N – порядок полосы, $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, то контраст спеклов в соответствующей области на экране камеры будет обратным исходному. В то же время контраст спеклов на участках, сместившихся на расстояние

$$\Delta z = \frac{N\lambda}{1 + \cos \theta_i}, \quad N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

остается неизменным. Телевизионное изображение объекта в его исходном состоянии записывается на видеодиске. После того как объект подвергли деформации, на другой дорожке видеодиска записывается второе телевизионное изображение. В процессе воспроизведения сигнал от второй дорожки вычитается из сигнала от первой дорожки. Полученный разностный сигнал выпрямляется с помощью двухполупериодного выпрямителя и повторно воспроизводится на телевизионном экране. На участках, где контраст спеклов не

изменился между двумя записями, разностный сигнал равен нулю и в изображении появится темная полоса. Области же, где контраст спеклов был обратным, проявятся в виде ярких полос, промодулированных спеклами. Таким образом, темные полосы представляют собой линии постоянных значений нормальных смещений.

С помощью сочетания телевизионной системы типа описанной выше со схемой спекл-интерферометрии с двумя освещающими волнами можно измерять смещения в плоскости.

Системы, основанные на методе временного промежутка, могут быть использованы также для получения контуров рельефа объектов. Для этого, если используется схема проецирования полос, достаточно просто заменить во время одной из записей исследуемый объект плоской поверхностью.

Особенно хорошо подходят телевизионные системы для измерения амплитуд колебаний, поскольку тогда не нужна стадия регистрации. В большинстве случаев при вибрационном анализе наибольший интерес представляет нормальная компонента движения, поэтому используется направленная по оси опорная волна.

Освещенность экрана телевизионной камеры интегрируется за период сканирования, который обычно равен $1/30$ с. Если

период колебания исследуемого синусоидально вибрирующего объекта меньше этого значения, зарегистрированное камерой распределение освещенности представляет собой картину спеклов, вариации контраста которой описываются функцией Бесселя.

Изменяющийся во времени сигнал, снимаемый с видеоконны при сканировании, проходит через высокочастотный фильтр, исключаяющий вариации пространственной частоты, более низкой, чем частота спекл-картины. Отфильтрованный сигнал поступает на телевизионный монитор вместе с неотфильтрованным, который используется в качестве источника внешней синхронизации. Выпрямление сигнала осуществляется с помощью электронно-лучевой трубки монитора. Области низкого контраста, которые возникают вблизи нулей функции Бесселя, видны на изображении, воспроизведенном на экране монитора в виде темных полос.

При определении перемещений в голографической интерферометрии используются параметры локализации полос и расстояния между полосами в области локализации. Расположим прямоугольную систему координат X_i ($i = 1, 2, 3$) таким образом, чтобы ее начало находилось в исследуемой точке поверхности тела, а ось X_1 была направлена вдоль нормали к поверхности тела. Пусть при наблюдении точки поверхности вдоль оси X_1 интерференционные полосы локализованы на расстоянии x_{1b} от нее. В этом случае тангенциальные компоненты вектора перемещения X_2 и X_3 определяются из выражений

$$X_2 = \lambda x_{1b} / L_{X_2}, \quad X_3 = \lambda x_{1b} / L_{X_3},$$

где L_{X_2} и L_{X_3} – расстояние между интерференционными полосами в направлениях соответствующих координат. Для определения компоненты X_1 необходимо найти перемещения X'_2 и X'_3 при другом направлении наблюдения изучаемой точки поверхности тела.

Несмотря на простоту, широкого распространения на практике этот способ интерпретации интерференционных полос не получил из-за недостаточной точности определения положения локализации полос, особенно в тех случаях, когда они локализованы вблизи изображения поверхности тела.

Информация о перемещениях точек поверхности деформируемого тела может извлекаться также на основе анализа контраста интерференционных полос на поверхности тела. Для круговой апертуры диаметром D при условии, что ее угловые размеры меньше индикатрисы рассеяния шероховатостей на поверхности тела, выражение для корреляционной длины l_0 имеет вид

$$l_0 \cong 0,6L_0\lambda/D,$$

где L_0 – расстояние от точки наблюдения до объекта.

Наблюдая интерференционную картину на поверхности тела через оптическую систему с переменной апертурой, можно зафиксировать исчезновение картины, когда тангенциальная компонента перемещения, например X_2 , станет больше корреляционной длины

$$X_2 > l_0.$$

Описанная методика обработки интерферограмм может быть усовершенствована для определения двух компонент вектора перемещений X_2 и X_3 . Очевидно, что для этой цели следует наблюдать интерферограмму с помощью щелевой апертуры переменного размера, вращающейся вокруг оси X_1 . Устанавливая апертуру в положении максимального контраста полос, можно определить направление компоненты перемещения нормальной оси наблюдения. Далее, меняя размер апертуры и добываясь пропадания полос, определяем эту компоненту. Описанный метод может применяться только при условии, если экспериментатор обеспечивает получение интерферограмм высокого качества и уровень шума в восстановленном изображении не является помехой точному измерению параметров интерферограммы

и установлению самого факта возникновения или исчезновения интерференционных полос в исследуемой области.

Другим методом расшифровки интерферограмм является метод интерпретации по абсолютным порядкам полос.

Для нахождения полного вектора перемещения в точке необходимо определить три его проекции на различные векторы чувствительности, т.е. необходима регистрация картин интерференционных полос с трех различных направлений наблюдения. В результате обработки трех интерферограмм для рассматриваемой точки поверхности тела получается система уравнений

$$k_1 d = n_1 \lambda,$$

$$k_2 d = n_2 \lambda,$$

$$k_3 d = n_3 \lambda,$$

где n_1, n_2, n_3 – абсолютные порядки интерференционных полос в исследуемой точке, определенные по соответствующим интерферограммам; k_1, k_2, k_3 – векторы чувствительности для выбранных трех направлений наблюдения, λ – длина волны света.

Решение системы уравнений для некомпланарных векторов чувствительности позволяет получить вектор перемещения точки поверхности тела. Принципиальным моментом, определяющим возможность использования рассмотренного способа интерпретации голографических интерферограмм, является знание абсолютных порядков полос на всех интерферограммах. Это обстоятельство и определило название способа расшифровки интерферограмм.

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ

Многие оптически прозрачные материалы (стекло, полимеры, кристаллы), изотропные в обычных условиях, становятся анизотропными после механического нагружения. При прохождении света в них возникает двойное лучепреломление, величина которого характеризует степень напряженного состояния контролируемого объекта.

Согласно закону Вергейма разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей определяют по формуле

$$\delta = cl(\sigma_1 - \sigma_2),$$

где σ_1 и σ_2 – разность главных напряжений, l – толщина изделия; k – оптическая постоянная материала изделия, определяемая экспериментально.

Внутреннее напряжение определяют с помощью полярископа, типовая схема которого показана на рис. 6.1.

Анализатор приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость и создает условия для их интерференции. При этом на экране видна система темных и светлых полос, соответствующих разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей $\sigma = m\lambda$, где m – порядок полосы; $m = 0, 1, 2, \dots$ для светлых полос и $m = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ для темных полос.

Порядок полосы определяется на основании наблюдения за картиной интерференции в процессе возрастания нагрузки. В белом свете видны цветные полосы и процесс измерения заключается в оценке цвета поля после введения контролируемого объекта и его сопоставления с цветом тарировочной таблицы.

Для определения направлений главных напряжений пластинки выводят из полярископа. При этом возникает картина изоклин (геометрическое место точек, где направления главных напряжений совпадают с плоскостью поляризации прибора). Синхронно вращая поляризатор и анализатор, можно зафиксировать поле изоклин.

Пластинки $\lambda/4$ служат для создания круговой поляризации и увеличения чувствительности. Обычно их подбирают такой толщины, чтобы без объекта поле полярископа было окрашено в "чувствительный" фиолетовый цвет (разность хода, вносимая при этом пластинкой, около 570 нм). При этом небольшим изменениям разности хода в объекте соответствует резкое изменение цвета. Для более точных количественных измерений разности хода лучей и фаз колебания, создаваемых образцом, применяют специальные устройства – компенсаторы.

Методы исследования напряжений в оптически прозрачных изделиях с помощью поляризованного света широко применяют в различных отраслях промышленности – стекольной, электровакуумных приборов, химической, в производстве полимеров, алмазных инструментов, различных искусственных кристаллов (в том числе лазерных) и др.

Создание преобразователей изображения позволило распространить методы фотоупругого анализа на материалы, непрозрачные в видимом свете (полупроводники, германий и кремний, инфракрасные стекла и ряд других). Известны телевизионные инфракрасные полярископы, системы с лазерным сканированием (полярископы с оптико-механическим сканированием объекта).

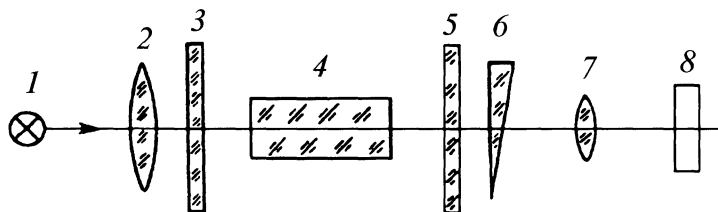


Рис. 6.1. Схема полярископа для контроля внутренних напряжений в прозрачных объектах:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – поляриод; 4 – объект; 5 – анализатор;
6 – поляризационный компенсатор; 7 – окуляр; 8 – наблюдатель

Контроль качества изделий вращением плоскости поляризации. Некоторые вещества называют оптически активными, т.е. обладающими свойством вращения плоскости поляризации проходящего через него линейно поляризованного света.

Различают естественную оптическую активность, встречающуюся у различных твердых и жидких веществ, и искусственную, возникающую у некоторых материалов при воздействии магнитного (эффект Фарадея) или электрического (эффект Керра) полей.

Электрооптические и магнитооптические эффекты находят применение преимущественно в системах модуляции и сканирования света. Естественная оптическая активность широко используется в пищевой и химической промышленности для контроля качества различных веществ, в основном, растворов.

Для растворов угол вращения плоскости поляризации $\varphi = |\alpha| l C$, где $|\alpha|$ – постоянная вращения; l – толщина слоя; C – концентрация раствора.

Для измерения угла вращения анализатор дважды (до вещества и с веществом в измерительной кювете) устанавливают на одинаковую яркость и регистрируют полученную разницу отсчетов по угломерному устройству.

Для повышения точности измерения применяют полутеневые устройства. Они состоят из двух анализаторов, разделенных тонкой границей раздела, плоскости поляризации которых ориентированы под небольшим углом друг к другу. Таким образом, измерение сводится к установлению фотометрического равновесия соприкасающихся полей, что значительно точнее метода гашения яркости.

Основными областями применения поляризационных приборов являются:

- исследования кристаллов с помощью поляризационных микроскопов и конометров;
- контроль качества алмазов по степени поляризации их люминесценции. Определение напряжений в непрозрачных объектах с помощью оптически-активных покрытий;
- интерференционно-поляризационная микроскопия для контроля качества оптически прозрачных сред с фазовыми неоднородностями;
- эллипсометрия как метод контроля тонких пленок в полупроводниковой электронике;
- контроль качества материалов с помощью измерения степени поляризации рассеянного излучения;
- измерение степени поляризации света различных источников;
- контроль качества элементов поляризационных приборов (модуляторов, ска-

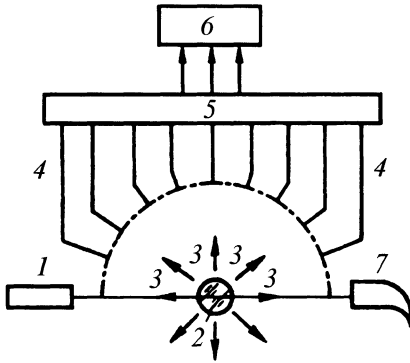


Рис. 6.2. Схема лазерной

гониофотометрической установки:

- 1 – лазер; 2 – источник потока частиц;
 3 – рассеянное излучение; 4 – световоды;
 5 – многоэлементный фотоприемник; 6 – блок
 обработки информации; 7 – световая ловушка
 для гашения прямого излучения

наторов, компенсаторов, поляризаторов и т.д.);

- устранение вредных бликов и рефлексов в аппаратуре;
- стереоскопия с поляроидной сепарацией стереопар.

Нефелометрические методы контроля структуры. Нефелометрами называют приборы для измерения концентрации взвешенных частиц в жидкостях и газах.

Принцип их действия заключается в регистрации степени ослабления проходящего через объект света в процессе рассеивания его на оптических неоднородностях.

Интенсивность рассеяния для малых частиц ($\approx 1/10 \lambda$) в соответствии с законом Рэля обратно пропорциональна четвертой степени длины волны света. В связи с этим в нефелометрии целесообразно использование коротковолновой области (УФ и синие лучи). Рассеяние света сопровождается его поляризацией. Пространственное распределение рассеянного света имеет симметричный характер относительно направления первичного пучка и перпендикулярного к нему направления. В плоскостях, перпендикулярных к оси ис-

ходного пучка, интенсивность рассеянного света одинакова. Для произвольного направления под углом α к оси первичного пучка интенсивность света равна

$$I_{\lambda} = I_1(1 + \cos^2 \alpha),$$

где I_1 – интенсивность в направлении, нормальном к исходному.

Существуют две разновидности метода – турбидиметрия, основанная на измерении интенсивности света, прошедшего среду ($\alpha = 0$), и собственно нефелометрия, в основе которой лежит регистрация интенсивности рассеянного излучения ($\alpha = 90^\circ$). Основное уравнение турбидиметрии записывается в виде

$$I = I_0 \exp(-k C l),$$

где I_0 – интенсивность падающего на среду света; k – полярный коэффициент мутности (для сферических непрозрачных частиц радиуса), C – концентрация взвешенных частиц; l – толщина слоя контролируемой среды.

Эта зависимость аналогична выражению для закона Бугера, поэтому для турбидиметрических измерений могут быть использованы абсорбционные фотоколориметры (концентрагомеры). Фотоколориметры успешно применяются для турбидиметрических определений мутности питьевой воды, выбраковки бутылок с напитками и ампул с лекарствами, содержащих посторонние частицы, контроля работы различных фильтров и центрифуг, измерения концентрации дыма и пыли и т.д. При нефелометрических измерениях концентрации частиц обычно пользуются формулой

$$I = k_1 I_0 \frac{N_0 V^2}{\lambda^4},$$

где I_0 – исходная интенсивность света; N_0 – число частиц в единице объема; V – объем частиц; λ – длина волны; k_1 – коэффициент пропорциональности.

Это выражение может применяться для анализа сред, различающихся только по степени дисперсионности и concentra-

ции частиц. Закономерности рассеяния света на частицах, сравнимых или больших длина волны света ($2 \dots 100$ мкм), отличны от описанных выше и значительно сложнее. Для анализа подобных сред используют лазерные гониофотометрические установки (рис. 6.2), позволяющие измерять интенсивность рассеянного света в большом диапазоне углов ($0 < \alpha < 180^\circ$) с последующей обработкой на ЭВМ.

6.2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Голографические методы эффективно используются для анализа размеров $5 \dots 100$ мкм и относительного положения частиц в газообразных и жидких средах. Подобные системы крайне необходимы для контроля окружающей среды, оценки качества двигателей, анализа процессов распыления жидкого топлива, анализа аэрозолей в ракетных двигателях.

Типовой голографический анализатор частиц состоит из двух систем – системы регистрации и системы воспроизведения. В системе регистрации импульсный лазер (обычно рубиновый) освещает исследуемый объект, экспонируя голограмму. Малая длительность импульса лазера ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) обеспечивает практическую неподвижность частиц, дает возможность одновременно зарегистрировать размер и относительное положение частиц в объеме с большими разрешением и глубиной поля зрения. В системе воспроизведения голограмма освещается гелиево-неоновым лазером, работающим в непрерывном режиме. При этом образуется видимое изображение порции частиц (например, тумана). Наблюдение и измерение размеров и положения частиц в различных плоскостях исследуемого объема проводят с помощью телевизионной камеры. Используя различные длины волн для записи и восстановления голограмм, можно дополнительно повысить разрешающую способность системы.

В голографических анализаторах структуры используется схема получения голограмм фазовых прозрачных объектов, отличающихся от подобных систем для непрозрачных объектов геометрией просвечивания объекта, а также методикой интерпретации результатов. Методы голографической интерпретации (в том числе фильтрации) успешно применяются для контроля однородности показателя преломления и наличия двулучепреломления в оптически прозрачных средах.

В ряде процессов (релаксация полимеров, процессы диффузии и т.п.) необходимо оценить изменение подвижности и средний размер частиц, составляющих среду, в различные моменты времени. Если эти процессы протекают медленно ($1 \dots 10^6$ с), то единственным способом контроля является метод голографической коррелометрии (МГК), который основан на получении с помощью двулучевой схемы голограммы рассеивающей среды в отраженном свете (при одностороннем доступе). Направление освещения между экспозициями меняется на угол θ , что вызывает регулярный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ на элементах рассеивателя и появления в изображении системы эквидистантных интерференционных полос. Так как состояние среды за время τ между экспозициями изменится, уменьшится контраст полос.

Зная статистические характеристики среды и экспериментально снятые зависимости видимости полос от времени анализа, можно оценить подвижность и размеры микрочастиц в диапазоне $0,01 \dots 1$ мкм.

Приборы телевизионной и когерентно-оптической структуроскопии. Во многих случаях информация о качестве объектов контроля может быть получена на основе анализа структуры материала. Для этих целей создан ряд приборов, среди которых наибольшее распространение получили телевизионные анализаторы (ТВА) и когерентно-оптические процессоры (КОП).

Действие ТВА основано на сканировании изображения изучаемых структур видеодатчиком (телевизионной камерой или устройством типа "бегущий луч") и последующей машинной обработке получаемых видеосигналов с помощью вычислительных средств (микропроцессора, микроЭВМ и т.д.). При этом эффективным оказался подход, основанный на моделировании изображений полем случайных величин. Геометрические, фотометрические и другие характеристики изображений анализируются с позиций теории случайных процессов. Получаемые при этом статистические характеристики имеют четкий физический смысл – они отражают пространственную упорядоченность и функциональные свойства исследуемых структур, которые, в свою очередь, влияют на прочностные, электрические, оптические и другие характеристики объектов контроля.

Схемы ТВА включают устройства формирования оптических изображений объекта, телевизионную систему и устройство обработки видеосигнала, выполняемого на базе встроенного в структуроскоп микропроцессора или с помощью внешней ЭВМ. В состав математического обеспечения обычно входят программы, обеспечивающие автоматический поиск объектов, контурное слежение и построчное сканирование в пределах заданного контура, а также вычисление необходимых статистических характеристик объектов. Время ввода телевизионного кадра составляет 0,02 с (реальное время). Время обработки зависит от сложности изображения, характера решаемой задачи и составляет в среднем 0,1 ... 1 с.

В случае применения КОП анализируется Фурье-спектр исследуемых структур, получаемый с помощью оптических процессоров. Перспективно применение гибридных методов контроля, при которых предварительная обработка изображений (выделение объектов с заданными признаками, проведение операций свер-

ки, пространственной фильтрации и т.п.) производится быстродействующими КОП, а процедуры последующей классификации структур осуществляются ЭВМ (подсчет коэффициента формы, вычисление числа одинаковых элементов в поле зрения, корреляционный анализ, вычисление статистических характеристик и т.д.).

Становится возможным проведение стереологического анализа структур, т.е. определение трехмерной структуры объектов по их плоским срезам (согласно принципу Кавальери). Подобные методы контроля и анализа широко применяются в металлловедении, микробиологической промышленности, других областях.

Лазерные методы контроля полупроводников и оптически прозрачных материалов. Исследуемый образец можно просвечивать либо узким, либо широким лазерным лучом. В первом случае лазерный луч с помощью оптической системы сканирует образец. Во втором – оптическая система формирует широкий луч, который просвечивает весь исследуемый образец. В обоих случаях определяется коэффициент пропускания, который может быть найден в каждой точке образца.

Физическая модель метода основана на определении поглощения света и в большей мере применима к поглощающим материалам, среди которых наибольший интерес представляют полупроводники.

Метод фотоэлектрической инфракрасной дефектоскопии для измерения и наблюдения картин прозрачности и двупреломления полупроводниковых кристаллов, прозрачных в средней инфракрасной области спектра, основан на последовательном измерении в отдельных точках исследуемых образцов значений пропускания и двупреломления, характеризующих структурные несовершенства образцов из n -GaAs, n -GaP, n -Si, n -Ge. Это позволяет оценить степень примесной неоднородности и связать ее с условиями роста кристаллов.

Метод ИК-интроскопии заключается в просвечивании объектов исследования ИК-излучением и визуализации прошедшего через объект излучения с помощью электронно-оптического преобразователя или телевизионной системы. Однако применение в качестве источника излучения широкополосных тепловых излучателей значительно ухудшает качество изображения и затрудняет количественную интерпретацию получаемой информации.

Метод контроля с использованием магнитного и электрического полей. Исследование внутренних неоднородностей и дефектов материалов и изделий во внешних полях всегда предполагает получение дополнительной информации по сравнению с той, которая может быть получена при регистрации прошедшего, отраженного или рассеянного лазерного излучения, воздействующего на исследуемый объект.

В общем случае наложение направленных внешних воздействий приводит к снижению симметрии в системе, что при наличии вырожденных состояний всегда выражается в частном или полном снятии вырождения. Это проявляется в таких хорошо известных явлениях, как эффекты Штарка, Поккельса или Керра во внешнем электрическом поле, эффекты Зеемана, Фарадея или Фойгхта во внешнем магнитном поле, пьезоспектроскопический эффект и др.

Одним из использований эффекта Фарадея при изучении однородности свойств материалов является измерение с его помощью распределения свободных носителей в полупроводниковых материалах.

Фотоэлектрический метод. Проверка микросхем высокой степени интеграции часто оказывается более сложной проблемой, чем их изготовление. Среди существующих методов неразрушающего контроля полупроводниковых структур и интегральных схем (ИС) выгодно отличается фотоэлектрический, основанный на

зондировании лазерным лучом по поверхности исследуемой структуры с последующей обработкой выходных сигналов. Суть метода состоит в исследовании внутреннего фотоэффекта в полупроводниковых элементах ИС, а применение лазера вызвано необходимостью использования монохроматического источника, работающего на фиксированной длине волны.

Фотоэлектрическим методом возможно определение таких дефектов, как наличие инверсных слоев и каналов, мест локального умножения на поверхности, неоднородность в металлическом покрытии, загрязненные поверхности.

С помощью лазерного зонда можно определять границы переходов и тем самым находить величину бокового пробега диффузионных областей, измерять сопротивление транзисторов, обнаруживать плохой контакт металлизации с p -областями, выявлять места загрязнения поверхности.

Этими методами контроля можно определять толщины и диаметры, показатели преломления и поглощения материала, концентрацию свободных носителей заряда и их подвижность в полупроводниках, плоскостность и плоскопараллельность пластин, наличие анизотропии в элементах оптических систем, однородность отражения зеркал, величину и природу напряжений в материалах, дефекты в структурах интегральных схем и т.д.

С помощью различных систем преобразования изображения можно проводить визуальный контроль материалов, не прозрачных в видимой области спектра (полупроводников, кристаллов, некоторых минералов, пластмасс и т.д.).

Структурная схема прибора с преобразователем изображения показана на рис. 6.3. Она содержит источник излучения, оптические системы для формирования и фильтрации проникающего излучения и преобразователь изображения, на выходном экране которого наблюдают изображение объекта.

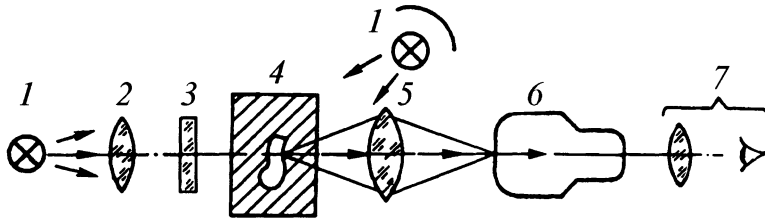


Рис. 6.3. Структурная схема прибора с преобразователем изображения:

1 – источник излучения; 2 – оптическая система осветителя; 3 – фильтр; 4 – объект контроля; 5 – фокусирующая оптика; 6 – преобразователь изображения; 7 – система наблюдения и регистрации

Различают активный и пассивный методы контроля. При активном контроле предполагается наличие источника излучения, внешнего по отношению к объекту и используемого для его контроля в проходящих или отраженных лучах. Для пассивного контроля используют собственное излучение объекта (например, тепловое).

Вследствие того, что спектральный диапазон, в котором работают преобразователи изображения, широкий, разнообразны используемые в них элементы.

В ряде задач контроля необходимо визуализировать конкретное сечение оптически прозрачного объекта. Например, это необходимо при контроле профиля показателя преломления в поперечных сечениях оптических волокон, лазерных кристаллов, в газовых струях ракетных двигателей и пр.

Для наблюдений отдельных слоев по глубине небольших объектов (ювелирные кристаллы алмазов, рубины, пластины стекла и т.д.) пригоден метод последовательной фокусировки, основанный на применении микроскопа с объективом, имеющим малую глубину резкости (≈ 1 мкм для микрообъектива с $\beta = 60^\times$).

Перефокусируя микроскоп, наблюдают различные слои объекта.

Перспективна модификация метода, основанная на применении "световой плоскости". Излучение источника света (обычно лазера) цилиндрической линзой преобразуется в плоский поток с малой

расходимостью. В фокусе линзы ширина пучка 10 ... 50 мкм в зоне ± 2 мм (вдоль пучка). Дефекты материала, рассеивающие свет (метод темного поля), визуализируют телекамерой, оптическая ось которой направлена ортогонально световой плоскости. При использовании ИК-лазера метод эффективен для исследования кристаллов кремния, фосфида индия, других материалов, применяемых в микроэлектронике. Аналогичный метод, но с боковым расположением телекамеры, применяют для изучения структуры потоков газа или жидкости.

Послойное наблюдение фазовых неоднородностей (свилы, пузыри, включения) в прозрачных объектах методом фокусировки возможно с помощью теневого или Шлирен-метода. Наличие градиента показателя преломления в среде в зоне дефекта, турбулентностей в нагретой жидкости вызывает отклонение лучей, формирующих его изображение. Лучи, идущие вне дефектной зоны, экранируются диафрагмой. Метод выявляет неоднородности показателя вплоть до $\Delta n = 10^{-6}$.

Эффективна модификация метода со сканированием объекта узким лучом, перемещающимся параллельно оси лазера с помощью дефлектора. При этом отклонение луча в зоне дефекта фиксируется позиционно-чувствительным фотодетектором или ПЗС-матрицей. Массив данных о положении луча вводится в ЭВМ и визуализируется на дисплее.

Наиболее совершенным является метод компьютерной многоактурной томографии. При этом объект (при его вращении) многократно с разных направлений просвечивается плоским пучком света. В памяти ЭВМ регистрируются данные о распределении соответствующего оптического параметра (коэффициенты поглощения, люминесценция, показатель преломления и т.д.) для текущей проекции. Затем с помощью известных алгоритмов реконструируют изображение слоя на дисплее. Для высокопреломляющих объектов (лазерные кристаллы, стекла, полупроводники) целесообразно размещение их в иммерсии (жидкость с близким показателем преломления) для уменьшения краевых эффектов, переотражения от поверхностей изделия и т.п.

6.3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Спектральный анализ – это анализ качественного и количественного состава вещества по атомным, молекулярным или ионным спектрам испускания или поглощения. Если исследованию подвергается спектр испускания (излучения), анализ называют эмиссионным, если же исследуется спектр поглощения – абсорбционным. Существуют другие, более сложные спектры, которые используются в научных исследованиях, например спектры комбинационного рассеяния.

Достоинствами спектрального анализа являются его экспрессность и возможность автоматизации. Наибольшей скорости и эффективности достигают при фотоэлектрической регистрации спектров, когда массовому анализу подвергают однотипные сплавы или другие образцы материалов. В среднем на проведение анализа затрачивается 2 ... 6 мин, причем одновременно анализируется в зависимости от требований заказчика и модификации

прибора не менее 5–10 элементов.

Спектральный анализ применяют для определения содержания примесей в чистых и высокочистых веществах, в черной металлургии анализируют состав руд и шлаков, сталей и чугунов на выпуске и по ходу плавки. Методы спектрального анализа используют для анализа объектов окружающей среды, в геологии, горнодобывающей, нефтеперерабатывающей промышленности, биологии, медицине, астрономии и т.д.

Атомно-эмиссионный спектральный анализ – это анализ элементного состояния вещества по спектрам излучения (испускания). Для того чтобы получить атомный спектр, необходимо нагреть вещество до парообразного состояния. При этом происходит возбуждение атомов – переход электронов с одних уровней на другие, испускаются кванты электромагнитного излучения. Если свет, излучаемый возбужденными атомами вещества, направить в спектральный аппарат, он разложится в спектр – набор излучений определенной длины волны и частоты.

Метод позволяет анализировать вещество в любом агрегатном состоянии без особой подготовки проб по общей схеме. Метод селективный. Одновременно из одной навески можно определить более 30 элементов, не применяя их разделения. Эмиссионный спектральный анализ достаточно чувствительный. Он имеет нижний предел обнаружения 10^{-3} ... 10^{-4} %, а в некоторых случаях и 10^{-5} %.

Различают качественный и количественный методы атомно-эмиссионного спектрального анализа. Задача качественного анализа – идентификация элементов пробы. Качественный анализ может быть полным (идентификация образца неизвестного происхождения) или частичным (на определенные элементы) в зависимости от поставленных задач.

Качественный анализ может производиться двумя способами.

1. Определив длину волны интересующей спектральной линии, по атласу спектральных линий устанавливают, какому элементу она принадлежит. Для расшифровки необходим спектр сравнения.

2. Определив по атласу или справочнику длину волны интересующего элемента (наиболее интенсивную его линию), ищут эту линию на спектрограмме и в случае ее обнаружения считают, что элемент присутствует в пробе.

Количественные методы определения массовой доли элементов в исследуемой пробе основаны на зависимости интенсивности спектральных линий от концентрации атомов этих элементов в пробе.

Для регистрации спектров применяют три способа: визуальный, фотографический и фотоэлектрический. Соответственно и приборы разделяются в зависимости от способа регистрации спектра на приборы с визуальной регистрацией – стилоскопы, с фотографической регистрацией – спектрографы и с фотоэлектрической регистрацией – квантометры, фотоэлектрические стилометры, спектрометры.

Приборы с фотографической регистрацией спектров. С помощью спектрографов можно проводить качественный, количественный и полуколичественный анализы веществ в любом агрегатном состоянии. Спектрографы отличаются типом диспергирующих устройств, источником возбуждения спектров, разрешающей способностью, светосилой и другими характеристиками. Наиболее распространенными являются спектрографы с кварцевой или стеклянной оптикой (ИСП-30, ИСП-51) с дифракционными решетками (ДФС-8, ДФС-452, 457, СТЭ-1-1М) и др. Это высокоинформационные приборы, степень информативности которых зависит от фиксируемой области спектра, дисперсии, светосилы. Дифракционные спектрографы имеют большую протяженность

спектра и позволяют анализировать одновременно до 70 элементов.

Приборы с фотоэлектрической регистрацией спектра. Эти приборы основаны на измерении аналитического сигнала при помощи фотоэлементов (ФЭ) или фотоумножителей (ФЭУ). Аналитическим сигналом является интенсивность излучения. Для регистрации сигналов излучение каждой линии выводят на фотоэлектрический приемник последовательно или используют такой фотоэлектроприемник, на котором аналитический сигнал каждой линии регистрируют одновременно, но отдельно друг от друга.

Последовательная регистрация излучения отдельных участков спектра называется сканированием, а прибор, позволяющий это осуществить, – монохроматором. Одновременную регистрацию всех изучаемых излучений производят полихроматором. Для вывода излучения из общего пучка используют щели. В монохроматоре щель одна, в полихроматоре несколько – по числу определяемых элементов. Фотоэлектрический приемник излучения устанавливают за щелью. Сканирование осуществляют либо перемещением щели, либо вращением диспергирующего устройства.

Атомно-абсорбционный анализ основан на изучении химического состава вещества по атомным спектрам поглощения. В основе лежит закон Кирхгофа, согласно которому элемент поглощает излучение той же длины волны, что и испускает в возбужденном состоянии. Принцип анализа состоит в переводе определяемого элемента в атомный пар, через который пропускают резонансное излучение определяемого элемента.

Излучение резонансной волны после поглощения выделяется монохроматором и направляется на фотодетектор, выходной сигнал которого после усиления регистрируется.

Интенсивность резонансного излучения регистрируется дважды – до и после распыления вещества. Разность этих интенсивностей является мерой абсорбционного поглощения и пропорциональна концентрации определяемого элемента.

В атомно-абсорбционной спектрофотометрии действует закон, аналогичный закону Бугера:

$$I = I_0 l^{-kIC},$$

где I_0 и I – соответственно интенсивность излучения до и после поглощения; l – толщина поглощающего слоя плазмы; k – коэффициент поглощения, рассчитанный на моль элемента для центра линии поглощения; C – концентрация поглощающих атомов.

Атомно-абсорбционная спектрофотометрия отличается высокой селективностью и чувствительностью. Предел обнаружения составляет 10^{-12} ... 10^{-14} г (10^{-5} ... 10^{-8} %). Относительно простая методика определений позволяет его использовать для анализов различных материалов: горных пород, нефтепродуктов, особо чистых веществ. Всего определяют более 80 элементов периодической системы. В черной металлургии атомная абсорбция широко применяется для анализов сплавов черных металлов, шлаков, руд. Она позволила снизить пределы обнаружения микропримесей в сталях и сплавах, повысить точность и чувствительность определения в них легирующих элементов, и, в свою очередь, повысить качество металлопродукции и экономить дорогостоящие добавки.

Производительность аналитического контроля при атомно-абсорбционном методе возрастает в 4 ... 5 раз. Достоинством является возможность определять не только микропримеси, но и высокие содержания элементов с погрешностью, как в классических химических методах анализа, 0,1 ... 0,3 %.

Спектры поглощения расположены в видимой и УФ-областях, бедны линиями, поэтому практически не имеется их нало-

жения, что облегчает идентификацию. Практически отсутствуют спектральные помехи, а способы измерения не требуют такой высокой точности, как в эмиссионном спектральном анализе, поскольку измерению подвергается не абсолютная величина сигнала, а отношение величины непоглощенного сигнала к поглощенному.

Большим преимуществом является возможность применения для градуировки не только стандартных образцов, но и чистых солей и синтетических примесей. К недостаткам метода следует отнести сложности в анализе элементов, обладающих высокой энергией диссоциации или не имеющих линий поглощения в доступных для наблюдения областях спектра – это инертные газы, сера, азот, кислород, водород, углерод, галогены и другие, линии которых расположены в далекой ультрафиолетовой области и для анализа необходим вакуумный спектрометр.

Приборы атомно-абсорбционного анализа называются атомными абсорбционными спектрофотометрами. Они состоят из следующих основных элементов: источника света, модулятора, атомизатора, монохроматора, детектора, усилителя и отсчетного устройства. Источник света излучает линейчатый спектр, содержащий линию определяемого элемента. В атомизаторе (в пламени или графитовой печи) проба превращается в атомные пары, которые поглощают свет соответствующей длины волны, в результате чего интенсивность света уменьшается. Монохроматор выделяет узкую спектральную полосу, содержащую спектральную линию определяемого элемента. Модулятор прерывает поток света от источника. Детектор превращает световой поток в электрический сигнал.

Оптические схемы атомно-абсорбционных спектрофотометров. Оптические схемы состоят из монохроматора и осветительной системы, с помощью которых выделяют узкий спектральный участок. Монохроматор представляет собой сложную оптическую конструкцию, со-

стоящую из щели, линзы, зеркала и диспергирующего устройства – призмы или дифракционной решетки. В последние годы наиболее часто применяют дифракционные решетки с 100 ... 300 штр/мм.

В однолучевой системе определяется интенсивность света, прошедшего через поглощающий слой, содержащий и не содержащий исследуемый раствор. Разность отсчетов характеризует величину аналитического сигнала.

В двухлучевой системе луч вращающимися зеркалами делится на два, один из которых проходит через атомизатор, а другой – мимо. Затем они с помощью полупрозрачного зеркала поочередно направляются на щель монохроматора и сравниваются по интенсивности. Если в атомизаторе проба отсутствует, интенсивности обоих лучей равны и аналитический сигнал равен нулю. Если второй луч проходит через атомизированную пробу, прибор реагирует на изменение сигнала абсорбции и его регистрирует.

Нелинейно-оптическая структуро-скопия. Разработка мощных лазеров позволила реализовать плотности излучения, при которых возникают нелинейно-оптические эффекты взаимодействия света с веществом (генерация высших гармоник, самопросветление среды, самофокусировка излучения в фазовых объектах и др.).

Разработан метод, основанный на облучении полупроводника импульсами мощного лазера и регистрации параметров генерируемого при этом излучении второй гармоники. Интенсивность и степень поляризации этого излучения несут информацию о степени аморфизации подповерхностных слоев полупроводника, подвергнутого отжигу или другим процедурам. Излучение возбуждающего лазера фокусируется на объект микрообъективом, что обеспечивает высокое (~1 мкм) пространственное разрешение.

Для анализа состава и топологии распределения элементов по поверхности

объекта (например, полупроводника) используют эффект ВРМБ (вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюена). При облучении мощным лазером в спектре отраженного от объекта излучения возникают дополнительные частоты (линии-спутники), интенсивность и частота (длина волны света) которых характеристичны. Каждый элемент имеет свою характерную линию вторичного спектра, интенсивность которой пропорциональна его концентрации. В приборной реализации метода также используется механическое сканирование образца под лазерным лучом.

6.4. ОПТИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ

Диагностика промышленного оборудования предусматривает оценку его состояния прочностными расчетами. Однако такие расчеты могут считаться надежными лишь при условии достоверного знания марки стали, ее микроструктуры, наличия и характера дефектов, уровня деградации металла в процессе эксплуатации объектов.

При диагностике и особенно при паспортизации объектов нередко возникает вопрос о химическом составе и марке стали. Особенно это касается старого и импортного оборудования.

Даже в пределах норм ГОСТов возможен существенный разброс как химического состава, так и механических характеристик стали. Кроме того, в ходе эксплуатации в металле происходят изменения, связанные с процессами старения, интеркристаллитной коррозии, обезуглероживания и т.п. Все это сказывается на эксплуатационной надежности оборудования и может быть учтено лишь при условии проведения металлографического анализа.

Технология микроструктурного мониторинга (наблюдения за деформацией микроструктуры) включает в себя: определение мест контроля, подготовку шли-

фов, металлографический анализ средствами микроскопии с записью и компьютерной обработкой портретов микроструктур, заполнение базы данных по микроструктурам металла образцов (электронный атлас) и работу с этой базой.

Обычно анализ микроструктуры проводят в лаборатории на взятых из объекта образцах. В этом случае микрообразцы в зонах элементов контролируемого оборудования получают методом электроэрозионной вырезки. Микрообразцы берут из регламентируемых зон оборудования, определенных с учетом расчета напряженного состояния, результатов неразрушающего контроля и опыта контроля повреждений стареющего оборудования.

Ввиду затруднительности вырезки образцов из деталей действующего оборудования возникает потребность либо исследования микроструктуры металла на месте с помощью переносимого металломикроскопа, либо использования метода отпечатков, обрабатываемых затем в лабораторных условиях.

Технология снятия отпечатков заключается в приготовлении микрошлифа (диаметром 15 ... 20 мм) на выбранной зоне объекта и собственно получении отпечатков микроструктуры. На контролируемом элементе отмечается интересное исследователя место. В случае нештатных ситуаций в первую очередь исследуются аварийные участки, подвергшиеся недопустимым воздействиям (температура, давление и т.п.). Для получения микрошлифа поверхность металла очищают от накипи, ржавчины, окислы и различных повреждений, снимают обезуглерожженный слой (если не исследуется сам слой).

В качестве штампея для получения отпечатка можно использовать металлический стержень диаметром 3 ... 6 мм с нанесенным на один его конец специальным слоем. Штампель приставляют рабочим слоем к поверхности шлифа и по верхнему концу стержня наносят легкий удар мо-

лотком. Отпечаток готов. Возможно также получение пластических реплик на полимерах, например полистироле. При этом время получения оттиска увеличивается до 2 часов. Отпечатки микроструктуры доставляются в лабораторию, где проводятся их микроанализ на стационарном металлографическом микроскопе, фотографирование и изготовление снимков микроструктур при нужных увеличениях. Если изображение с экрана микроскопа вводится в компьютер, исключается трудоемкое фотографирование.

Наблюдение шлифов чаще осуществляется на инвертированных микроскопах фирм Leica (DMILM), Carl Zeiss (NEOPHOT32, NEOAPHOT2000).

В настоящее время назрела объективная необходимость разработки и внедрения современных систем оперативной компьютерной металлографии на базе портативных микроскопов, отвечающих всем требованиям эксплуатации в полевых условиях. Особую актуальность приобретает разработка специализированных систем цифровой обработки металлографических изображений, поскольку в условиях возрастающего объема работ по мониторингу металла объектов и повышения ответственности за качество анализа структуры только современные компьютерные технологии могут обеспечить уровень неразрушающего контроля, адекватный значимости проблемы предупреждения и предотвращения техногенных катастроф.

Методы определения блеска. Блеск – свойство лакокрасочных покрытий и материалов определенным образом отражать свет. В зависимости от состояния поверхности покрытия световой поток, падающий в виде параллельного пучка на поверхность, отражается по-разному. Характер отражения подавляющего большинства лакокрасочных покрытий занимает промежуточное положение между диффузным и зеркальным отражениями. При диффузном отражении, одинаковом во

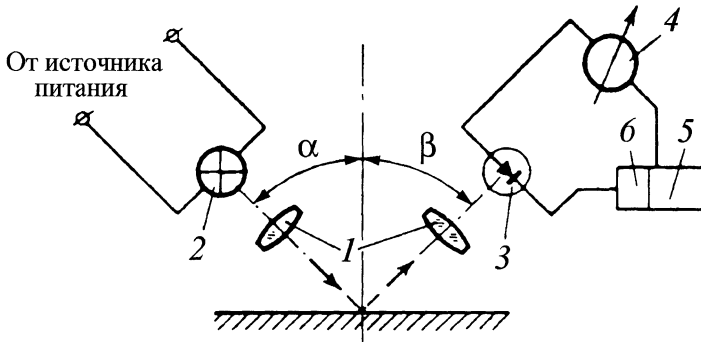


Рис. 6.4. Схема фотоэлектрического блескомера ИБП-2:

1 – оптическая система; 2 – осветитель; 3 – фотоприемник; 4 – измеритель;
5 – усилитель; 6 – приспособление для настройки электрической схемы

всех направлениях, поверхность покрытия кажется одинаково матовой. При зеркальном отражении параллельно падающие лучи отражаются под углом, равным углу падения. Чем больше в отраженном свете находится параллельно отраженных лучей, тем сильнее блеск покрытия, и наоборот. Трудно выбрать единый фотометрический параметр, хорошо коррелирующий со зрительной оценкой блеска. Тем не менее, за фотометрический параметр, определяющий блеск, принимают коэффициент яркости при определенных условиях освещения и наблюдения.

Основными факторами, обуславливающими потерю блеска покрытий в процессе эксплуатации, являются солнечная радиация и повышенная влажность воздуха. На начальных стадиях старения потеря блеска покрытий, содержащих один и тот же пленкообразователь, но различную пигментную составляющую, линейно зависит от потери массы в слое толщиной 1 мкм, что коррелируется с количеством энергии, поглощенной этим слоем пленки. Во всех случаях увеличение поглощения света в поверхностном слое покрытия и снижение предельных толщин слоя приводят к увеличению потери блеска.

Для оценки блеска лакокрасочных покрытий, имеющих различные характеристики отражения света, используются разные методы и приборы.

При определении блеска покрытий, отражающих свет на границе раздела

пленка–воздух, но не рассеивающих его в объеме, измеряют яркость поверхности испытуемого покрытия и идеально зеркальной поверхности (эталона) в тех же условиях освещения и наблюдения. В качестве эталона используется увеоловое стекло, зеркальная составляющая которого принята равной 65 %. Блеск покрытия характеризуется отношением полученного значения яркости испытуемого образца к яркости эталона.

Измерение блеска покрытий в процессе старения производится таким же способом. При этом первоначальный (исходный) блеск B_1 принимается за 100 %, а блеск покрытий после старения – B_2 . Потеря блеска B_n выражается в процентах от исходного значения:

$$B_n = \frac{(B_1 - B_2)}{B_1} 100.$$

Методы определения блеска с помощью блескомеров с разной геометрией углов. В зависимости от состояния поверхности покрытий измерение блеска производится на блескомерах под разными углами падения светового потока: покрытия с высоким блеском измеряют при геометрии угла 20°; глянцевые – при 45 и 60°; полуматовые – при 75 и матовые – при 85°.

В отечественной промышленности стандартизована методика определения блеска покрытий на блескомере ИБП-2 (МНПО "Спектр") с углом падения светового потока 45° (рис. 6.4). За рубежом в

большинстве стран стандартизована методика измерения блеска покрытий на приборах с геометрией угла 60° .

Блескомер ИБП-2 состоит из измерительной головки, блока питания с шунтирующими потенциометрами и измерителя. Измерительная головка прибора включает корпус с размещенными в нем под углом 90° держателями-тубусами для осветителя (СЦ-75) и фотоэлемента. Световой поток осветителя собирается линзой и падает на образец под углом 45° . Отраженные от поверхности покрытия лучи через диафрагму попадают на селеновый фотоэлемент с помощью системы линз. Фотоэлемент для замера блеска рассеянного света помещен в боковой тубус. Постоянное напряжение, подаваемое на осветитель, поддерживается трансформатором с ферромагнитным стабилизатором, вмонтиро-

ванным в футляр прибора. Это устройство обеспечивает воспроизводимость результатов измерения блеска с точностью до 1 % при колебании напряжения в сети до 20 %. Измерительным устройством в приборе является амперметр с пределом измерения 1 ... 10 мкА.

Имеются аналогичные по принципу действия карманные портативные приборы, удобные для измерения блеска лакокрасочных покрытий, экспонированных на климатических станциях или непосредственно на изделиях, работающих в полевых условиях.

Визуальный метод. На практике до настоящего времени широко используется визуальный метод определения блеска, который нашел отражение в ГОСТе. Оценка блеска производится по пятибалльной шкале.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ

7.1. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Простым и удобным средством контроля линейных размеров являются накладные (контактные) измерительные лупы (ЛИЗ-10^х и др.). Они состоят из стеклянной плоской шкалы (обычно длина 15 мм, цена деления 0,1 мм), накладываемой на объект и рассматриваемой в окулярную лупу с увеличением 10^х.

Измерительные микроскопы (в том числе портативные накладные) содержат набор измерительных шкал, расположенных в плоскости изображения микрообъектива и позволяющих контролировать линейные размеры деталей, радиусы, углы заточки резцов и т.п. Точность измерения с помощью окулярного винтового микрометра типа МОВ-15^х достигает 0,5 ... 1 мкм при увеличениях 10^х – 20^х. Поле зрения микроскопов обычно 1 ... 20 мм. Многие измерительные микроскопы оборудованы устройствами прецизионного перемещения изделий в предметной плоскости микрообъектива с возможностью отсчета координат. Это расширяет диапазон измерений при сохранении высокой точности (диапазон перемещения составляет 50 ... 200 мм, погрешность отсчета – до 1 мкм). Увеличение и, соответственно, глубина резкости микроскопов выбираются исходя из особенностей формы изделий. Многие модели современных измерительных микроскопов снабжаются устройствами измерения вертикального перемещения микрообъектива, т.е. обеспечивается трехмерное измерение объектов.

Универсальные измерительные микроскопы (УИМ). По принципу действия универсальные микроскопы представляют собой систему компараторов, работающих во взаимно перпендикулярных

направлениях. Кроме того, они снабжены целым рядом дополнительных приспособлений, которые и определяют их универсальность. Эти приборы целесообразно применять в измерительных лабораториях при разовых или групповых измерениях.

Визирная оптическая схема прибора УИМ подобна схеме микроскопа МИ. Вместе с визирным микроскопом применяют упомянутые выше сменные окулярные головки.

В микроскопе УИМ продольное и поперечное смещения стола измеряются с помощью отсчетных микроскопов со спиральными окулярными микрометрами. Следовательно, в измерительном устройстве отсутствуют мерительные винты и исключены погрешности, вызываемые неточностью изготовления винтовых пар. Отсчетные микроскопы установлены неподвижно. Максимально измеряемые размеры: продольные – до 200 мм, поперечные – до 100 мм. Цена деления шкалы спирального микрометра – 0,001 мм.

Универсальный измерительный микроскоп УИМ обычно бывает экранного типа.

Для контроля инструментов, резьбовых деталей, зубчатых колес, приборных камней, объектов сложной формы (например турбинных лопаток), а также изделий из хрупких и легкодеформируемых материалов применяют проекторы.

Существуют два основных способа проектирования в отраженных и проходящих лучах (эпи- и диапроекции).

Источниками света в проекторах обычно служат галогенные лампы накаливания мощностью 100 ... 500 Вт, охлаждаемые с помощью воздушной вентиляции. Оптическая система, как правило, содержит теплофильтр для устранения мощного теплового излучения этих источ-

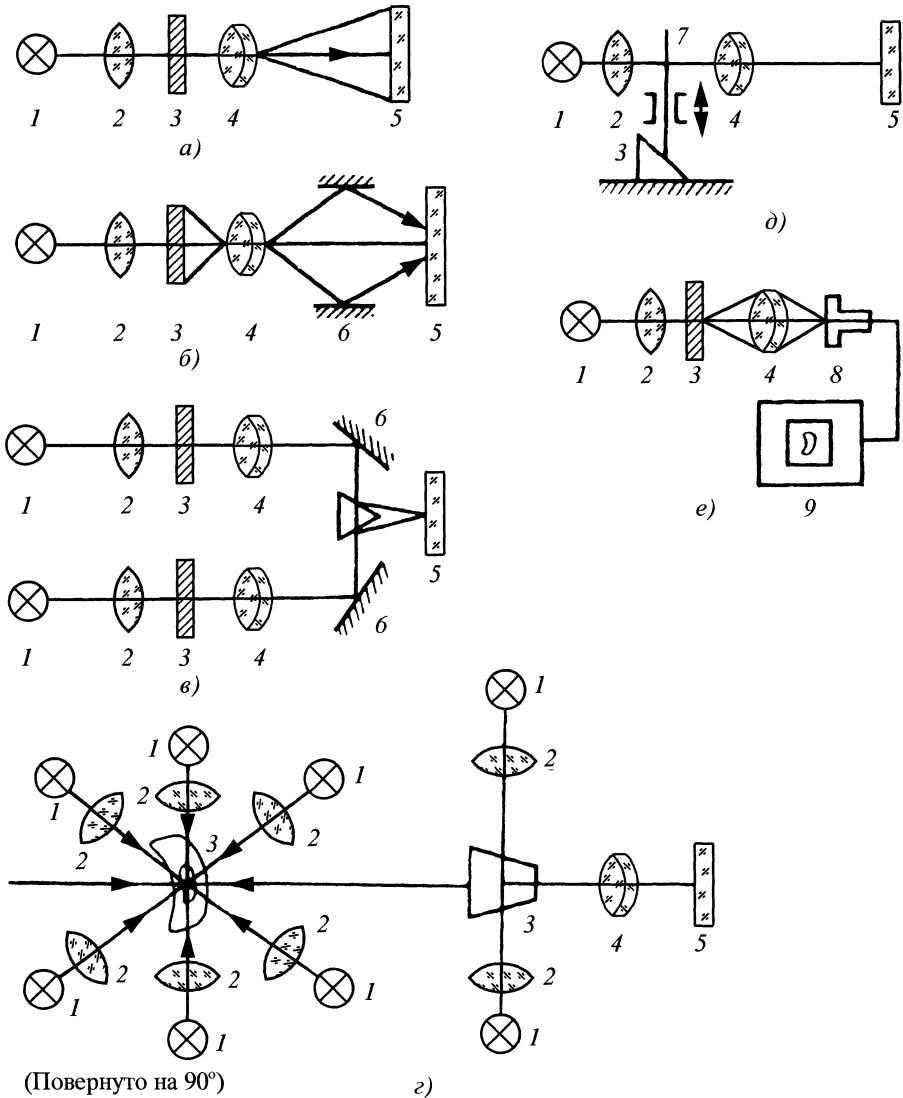


Рис. 7.1 Основные типы оптических схем проекторов:

a – подобного увеличения; *б* – сведенного изображения; *в* – оптический компаратор; *г* – светового сечения; *д* – контактно-проеекционный; *е* – телевизионный; *1* – источник света; *2* – конденсатор; *3* – изделие; *4* – объектив; *5* – экран; *6* – зеркало; *7* – подвижный щуп; *8* – телекамера; *9* – телевизор

ников (например, стекла типа СЗС-21 толщиной 2 ... 3 мм).

Экраны проекторов просветного типа должны иметь высокую разрешающую способность (до 50 мм^{-1}) и обладать хо-

рошими светорассеивающими свойствами для получения возможно более равномерного пространственного распределения яркости. В качестве материалов для экранов применяют матовые стекла, тонкие

матированные лавсановые пленки или специальные экраны с многослойными прозрачными покрытиями из мелкодисперсных красителей, а также линзы Френеля с тонкой растровой структурой. Хорошими свойствами обладают экраны из тонкого слоя воска на стекле, однако они сложны в изготовлении.

Объективы измерительных проекторов должны иметь высокую разрешающую способность ($100 \dots 200 \text{ мм}^{-1}$) по всему полю зрения и малую дисторсию изображения ($< 1 \%$).

Цвет экранов обычно нейтральный (белый), однако в последнее время выпускают просветные экраны с темными противоореальными слоями, снижающими влияние паразитных засветок. Размер экрана колеблется от 100×100 до 2000×2000 мм. Яркость экранов составляет в среднем $40 \dots 100 \text{ кд/м}^2$, что позволяет пользоваться проекторами при обычном освещении. Большинство проекторов обладает измерительными функциями. Измерения производят при сравнении изображения контролируемого изделия с его чертежом или шаблоном, выполненным в масштабе проекции и закрепленным на экране, или при перемещении предметного стола микровинтами до совмещения изображения контуров детали с меткой на экране. Размер детали определяют как разность соответствующих показаний микровинтов.

Многие измерительные проекторы имеют фотоэлектрические или магнитные датчики, позволяющие регистрировать перемещения стола на табло цифрового индикатора с точностью до $0,001$ мм. С помощью некоторых проекторов можно определять полярные координаты дефектов.

По типу оптической схемы проекторы можно классифицировать на следующие группы: 1) подобного увеличения; 2) сведенного изображения; 3) совмещенного и стереоскопического изображения; 4) светового сечения; 5) контактно-проекционные; 6) телевизионные (рис. 7.1).

Проекторы подобного изображения используют для контроля готовых изделий и в процессе их изготовления (станочные проекторы). Применение панкратических объективов позволяет решать задачи контроля пропорций изделий.

Проекторы сведенного (двойного) изображения применяют при массовом контроле однотипных деталей. Меняя угол наклона зеркал, устанавливают номинальный размер изображения. О качестве детали судят по отклонению ее изображения от эталона.

Оптические компараторы применяют для контроля деталей методом сравнения с эталонным изделием. Применяя светофильтры, ошибки разного знака можно характеризовать различными цветами. С помощью специальной осветительной системы можно получить объемное изображение изделия и контролировать его по трем координатам.

Проектор светового сечения позволяет получить на экране изображение профиля изделия сложной формы, освещаемого с боков плоскими пучками света. На изделие обычно наносят слой черни (сажи и т.п.), чтобы усилить контраст изображения. Точность измерения контура может достигать $\pm 0,01$ мм при увеличении $10 - 20\times$. При контроле протяженных изделий применяют цилиндрические объективы.

Контактно-проекционные приборы служат для контроля профиля изделий методом регистрации на экране изображения шупа, перемещение которого связано с изменением размера детали.

7.2. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

По сравнению с общеизвестными методами измерения размеров предметов: механическими, оптическими, электрическими и другими – телевизионные методы измерения имеют ряд преимуществ. Прежде всего это возможность проводить измерения бесконтактным способом, что в ряде случаев является решающим. Например при измерении размеров предметов,

прикосновение к поверхности которых нарушает их качество (оксидные покрытия на катодах прямо-усилительных ламп), измерении размеров предметов с высокой температурой (поковки в процессе изготовления), контроле размеров при быстром перемещении объекта (прокат металла), при опасности нахождения в данных помещениях (химически вредное или радиоактивное воздействие) и др. Меняя оптические устройства, можно измерять как микроскопические, так и макроскопические объекты. Неоспоримым достоинством телевизионных методов является получение информации о пространственном расположении и цветности объекта.

Наконец, можно контролировать размеры предметов в темноте при освещении их невидимыми лучами (например, контроль дефектов фотоэмульсии в инфракрасном свете).

Точность контроля с помощью ТС колеблется в широких пределах – от нескольких процентов до сотых и тысячных долей процента измеряемой величины в зависимости от выбранного способа контроля.

Измерение размеров с помощью ТС основано на эквивалентности некоторых электрических параметров, принятых в телевизионной технике, измеряемому размеру при однострочной развертке.

В общем виде это положение может быть выражено как $l = kf(\alpha)$, где l – измеряемый размер; k – коэффициент пропорциональности; $f(\alpha)$ – функция преобразования телевизионных параметров.

Индикация размера на выходе может быть получена в разнообразной форме: ток, напряжение, число импульсов, зажигание табло. Если необходима автоматизация процесса, выходной сигнал может воздействовать на исполнительный механизм.

В настоящее время разработано много принципов ТС для контроля линейных размеров, которые классифицированы по различным признакам.

Рассмотрим примерную классификацию, которая содержит три основные группы ТС: 1) для контроля линейных размеров; 2) для измерения площадей; 3) для измерения размеров по глубине пространства.

Наиболее разработанной является первая группа ТС; она может быть подразделена на два класса: датчики для непосредственных измерений и разностные датчики.

Способы, с помощью которых выполняются ТС для непосредственных измерений, весьма разнообразны и принцип действия основан, как правило, на измерении длительности видеоимпульса, эквивалентного контролируемому размеру. Измерения производятся путем счета электрических меток, накладываемых различным способом на видеоимпульсы, измерением постоянной составляющей видеоимпульсов или путем счета маркерных импульсов в видеосигнале, получаемых наложением той или другой системы оптических меток на изображение контролируемого предмета. Особенно перспективным в этом случае является использование волоконной оптики.

Способы, обеспечивающие измерение размеров с помощью разностных датчиков, также достаточно разнообразны и реализуются с помощью систем, сравнивающих полученный видеоимпульс с эталонным или компенсирующим основную длительность видеоимпульса; в последнем случае измерению подвергается только оставшаяся, некомпенсированная, обычно небольшая часть видеоимпульса, чем достигается резкое на один-два порядка повышение точности контроля. Указанная компенсации может производиться оптическим или механическим путем.

Способы измерения площадей отличаются от способов измерения размеров применением растрового разложения вместо однострочного с последующим суммированием полученных длительностей видеоимпульсов.

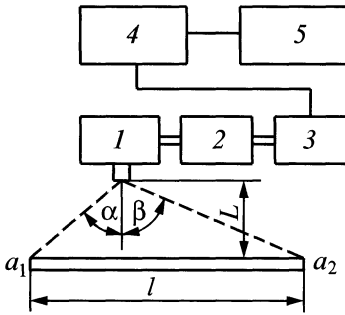


Рис. 7.2. Функциональная схема измерителя длины:

1 – камера; 2 – тангенсный счислитель; 3 – кодирующее устройство; 4 – цифровое табло; 5 – печатающее устройство

Способ измерения с помощью контрольной линейки. Рядом с измеряемым предметом размещается линейка с хорошо различимыми делениями. Для измерения достаточно посмотреть на экран ВПУ и определить, с какими делениями линейки совпадают края предмета. Тот же результат может быть получен при нанесении делений непосредственно на мишень передающей трубки.

Способ полного измерения расстояния между двумя краями предмета. Для этого собирается устройство в соответствии с рис. 7.2. Телевизионная камера устанавливается на расстоянии L от плоскости измеряемого предмета с таким расчетом, чтобы при ее повороте вокруг оси можно было последовательно получить изображения обоих краев предмета a_1 и a_2 в центре раstra. Тогда нетрудно определить искомый размер: $l = L(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$.

Автоматический контроль площади изделия. Телевизионный автомат для измерения площади плоского или площади проекции объемного предмета разработан также на времяимпульсной базе и основан на измерении суммарной длительности видеоимпульсов, возникающих от пересечения лучом изображения предмета на мишени передающей трубки. Тогда искомую площадь предмета можно выразить при условии, что время измерения

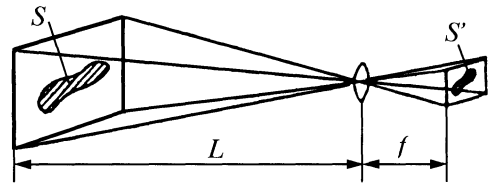


Рис. 7.3. Контроль площади предмета

составляет один кадр, следующим образом.

Из рис. 7.3 следует, что площадь предмета

$$S = S' \left(\frac{L}{f} \right)^2,$$

где S' – площадь изображения предмета в плоскости фотослоя передающей трубки.

Исходя из пропорциональности между длиной участков строк и длительностью видеоимпульса t_i можно написать:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{\sum t_i}{(Z - Z_{\text{обр}})(T - T_{\text{обр}})},$$

где S_0 – полная площадь раstra на фотослое передающей трубки; Z – полное число строк разложения; $Z_{\text{обр}}$ – потеря строк за время обратного хода по кадру ($Z_{\text{обр}} = 0,08Z$); T – длительность периода развертки по строкам; $T_{\text{обр}}$ – потеря полезной длительности строки за время обратного хода по строке ($T_{\text{обр}} = 0,18 T$).

Следовательно, площадь предмета может быть окончательно выражена таким образом:

$$S = 1,3 \frac{S_0}{ZT} \sum t_i.$$

Однако если учесть трудности вписывания раstra точно в заданные размеры, а также неточности в определении $Z_{\text{обр}}$ и $T_{\text{обр}}$, то наиболее целесообразно значение всего коэффициента перед $\sum t_i$ определять экспериментально.

Телевизионные автоматы с оптической дискретизацией изображения. Следующий этап развития ТС для контроля размеров изделий основан на введении в функцию преобразования числа дискретных оптических элементов, приходящихся на измеряемый размер.

Способы контроля в этом случае осуществляются за счет наложения на изображение мелкой равномерной штриховой маски или разбивки изображения на достаточно большое число равных частей с применением волоконной оптики. При сканировании изображения в видеосигнале будут присутствовать маркерные сигналы, которые в дальнейшем подсчитываются. Так как дискретизация производится непосредственно на изображении, дальнейшие искажения, возникающие из-за нелинейности сканирования, или изменения размеров развертки приводят только к изменению частоты или фазы следования маркеров, но не их числа, которое определяет размер предмета.

Погрешность измерения таких ТС может быть снижена до 0,1 ... 0,05 %.

Большим преимуществом систем с дискретизацией изображения является получение видеосигнала в цифровой форме, что существенно облегчает его дальнейшую обработку и введение в управляющие механизмы.

Хорошие результаты получены при использовании в качестве дискретизирующего устройства волоконной оптики. Простая оптическая схема такого типа представлена на рис. 7.4. Здесь изображение измеряемого объекта проецируется на торцы световодов, расположенных в один ряд вплотную друг к другу, противоположные торцы световодов располагаются на расстоянии меньшем апертуры передающей трубки в виде регулярного квадратного или спирального раstra или в виде гюгта с беспорядочным размещением световодов. С помощью второго объектива изображение торца волоконной оптики проецируется на фотослой передающей трубки.

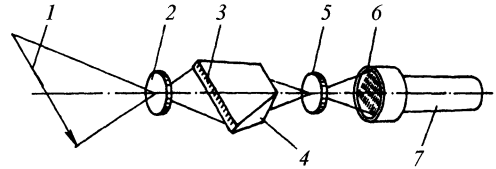


Рис. 7.4. Оптическая схема ТД с волоконной оптикой:

- 1 – контролируемый объект; 2 – объектив;
3 – проекция изображения объекта;
4 – волоконное оптическое кодирующее устройство (ВОКУ); 5 – объектив; 6 – проекция закодированного изображения; 7 – передающая трубка

В обоих случаях расположения световодов число засвеченных (или затемненных) торцов будет пропорционально измеряемому размеру. Поэтому, подсчитав число видеоимпульсов за один кадр с помощью обычного счетчика в первом случае или определив число засвеченных (или затемненных) торцов с помощью телевизионных методов подсчета объекта во втором, получаем точную информацию о протяженности объекта. Поскольку дискретизация изображения происходит до процесса развертки, точность метода обуславливается в основном механическими и температурными нестабильностями и может быть снижена до десятых долей процента.

Описанная волоконная оптика получила название ВОКУ – волоконное оптическое кодирующее устройство, так как здесь происходит своеобразное механическое кодирование изображения. Такое ВОКУ позволяет снизить в Z раз требования к разрешающей способности передающих трубок, где Z – число строк раstra на выходном торце ВОКУ.

Применение логической развертки в соединении с другой разновидностью ВОКУ позволяет значительно сократить избыточность информации, в частности, уменьшить необходимую полосу частот канала связи (в 50 раз при общем числе световодов, равном 10000). Для этого уложенные на входе ВОКУ в одну линию световоды располагаются на выходе ВОКУ

таким образом, что в первый верхний ряд подаются световоды, производящие грубое квантование изображения (через каждые 100 световодов), а в последующие нижние ряды – производящие точное квантование (в пределах каждой сотни световодов). Сканирование полученного таким образом раstra производится по строкам с помощью равносторонней пилообразной развертки, а по кадрам с помощью шаговой развертки.

7.3. ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ РАЗМЕРОВ

Существуют три основных метода измерения размеров с использованием лазеров:

1) метод измерения, основанный на прерывании лазерного пучка пересекающим его предметом;

2) метод измерения, основанный на сравнении размеров (положение изделия определяют относительно измерительной головки);

3) метод измерения, основанный на использовании явления дифракции.

Первый из перечисленных методов наиболее прост и заключается в том, что исследуемый объект пересекает ось пучка излучения лазера, двигаясь с известной скоростью или, наоборот, объект сканируется лазерным пучком. Сигнал на выходе фотоприемника, помещенного позади объекта, отсутствует в течение времени, пока пучок излучения прерывается объектом. Отсчет, соответствующий интервалу времени между моментами пересечения пучка излучения краями объекта, непосредственно связан с измеряемым размером. Такие измерения используют при контроле производственных процессов с помощью систем обратной связи. Указанный метод можно использовать для исследования профиля объекта при сканировании вдоль него измерений и для определения сферичности изделий при вращении объекта в пучке излучения. Основная погрешность в рассматриваемом случае свя-

зана с конечными размерами пучка излучения и неравномерностью профиля пучка.

Сравнительное измерение размеров заключается в определении положения измерительной головки и края объекта относительно друг друга. В ряде случаев в таких системах используют две головки, одна из которых задает опорный уровень.

Дифракционные методы сегодня обладают наибольшей гибкостью и наивысшей точностью среди рассмотренных, но они не обладают универсальной применимостью по отношению к изделиям различной формы и имеют ограниченный диапазон измеряемых размеров.

Перечисленные методы позволяют проводить измерения быстро и с высокой точностью. Все они являются бесконтактными и дистанционными. Приборы с использованием дифракционного метода сейчас наиболее распространены, поэтому рассмотрим этот метод подробнее.

В основе дифракционного измерения размеров лежит дифракция Фраунгофера. Дифракционная картина, например, от проволоки, помещенной в пучок лазерного излучения, представляет собой последовательность пятен, расположенных вдоль прямой линии, перпендикулярной проволоке (рис. 7.5). В центре получаемой на экране картины находится пятно недифрагированного излучения, а в направлении, перпендикулярном проволоке, располагаются максимумы дифракционной картины, координаты которых можно получить из выражения

$$\sin \varphi_n = \frac{n\lambda}{D},$$

где φ_n – угол между направлением лазерного излучения и направлением на n -е пятно; λ – длина волны излучения лазера; D – измеряемый диаметр проволоки.

Дифракционная картина не меняется при продольном перемещении проволоки, поэтому описанный метод может применяться при измерении диаметра проволоки в процессе ее вытягивания.

Диаметр можно измерить не только путем регистрации характеристических размеров, но и регистрируя интенсивность дифракционного распределения в фиксированных точках дифракционной картины. Второй метод основан на том, что интенсивность света в n -м дифракционном максимуме зависит от измеряемого диаметра D и описывается выражением

$$I(D)|_{\varphi_n = \text{const}} = (I_0 / U^2) \sin^2(UD),$$

где $U = \pi \sin \varphi_n / \lambda$, а I_0 – величина, пропорциональная интенсивности излучения лазера.

На практике применяют оба метода. Способ, основанный на регистрации интенсивности, более прост в реализации. Однако нетрудно видеть, что чувствительность способа падает с уменьшением диаметра D и по мере увеличения номера n , кроме того, на результат измерений существенное влияние оказывает нестабильность мощности излучения лазера, изменение чувствительности фотоприемников, а также временной уход диаграммы направленности излучения лазера. Способ, основанный на анализе размеров дифракционного изображения, характеризуется ростом чувствительности по мере уменьшения диаметра D , причем чувствительность не зависит от мощности излучения лазера, но этот способ измерений сложнее реализовать на практике.

Лазерные системы измерения и контроля размеров и линейных перемещений. Свойства лазерного излучения значительно расширили возможности интерферометрии для измерения длин и перемещений. Ограниченное использование интерферометров при таких измерениях было связано с качеством имеющихся источников света, не обладающих достаточной яркостью и когерентностью, что не позволяло получать четкую интерференционную картину при длине измерительного плеча более полуметра.

Современные лазерные интерферометры с одночастотным лазером обеспе-

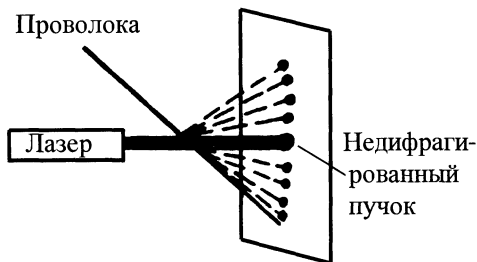


Рис. 7.5. Схема дифракционного метода измерения диаметра проволоки

чивают относительную погрешность измерения 10^{-6} в диапазоне перемещений до нескольких десятков метров и максимальной скорости перемещения до 10 м/мин. На результат измерений значительно меньше влияют внешнее освещение, вибрации, запыленность воздуха, что особенно важно в промышленных условиях.

При измерении линейных расстояний, исчисляющихся миллиметрами или сантиметрами, лазерный интерферометр дает возможность осуществить высокую точность измерений непосредственно в производственных условиях. Использование лазерного интерферометра в микроэлектронике для точного перемещения подложки интегральных схем открывает новые возможности на пути создания сверхминиатюрной радиоэлектронной аппаратуры. В оптической промышленности применение лазерного интерферометра позволяет изготавливать прецизионные оптические шкалы и дифракционные решетки.

Используя несколько измененный лазерный интерферометр, можно производить измерения скорости перемещений объекта, используя эффект Доплера, заключающийся в изменении частоты излучения в зависимости от скорости перемещения излучателя (или отражателя). Причем сигнал, отраженный непосредственно от металлических поверхностей объектов, оказывается достаточным для работы таких интерферометров. Это открывает большие перспективы применения таких измерительных систем в промышленно-

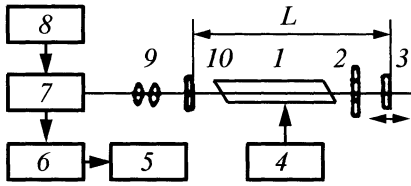


Рис. 7.6. Схема квантового интерферометра для измерения длин:

- 1 – газоразрядная лазерная трубка;
 2 – диафрагма; 3, 10 – зеркала оптического резонатора; 4 – источник питания лазера;
 5 – частотомер; 6 – усилитель;
 7 – фотодетектор; 8 – источник питания фотоприемного устройства; 9 – оптическая система

сти, например, для бесконтактного контроля скорости горячей прокатки, непрерывного контроля внешних и внутренних диаметров деталей непосредственно в процессе их обработки с точностью до 0,1 ... 0,2 мкм.

Благодаря малой угловой расходимости и высокой интенсивности излучения лазер может быть использован в системах центрирования и выставления объектов, например при нивелировке направляющих крупногабаритных станков, выверке вертикальной оси при строительстве башен, контроле прямолинейности, плоскостности и т.д.

Особенностью квантовых интерферометров является то, что объект измерений помещается в резонатор лазера или является его составной частью. В настоящее время широко используются квантовые интерферометры, основанные на принципе гетеродинирования частот и с трехзеркальным лазером.

Квантовые интерферометры с гетеродинированием частот. В этих интерферометрах резонатор лазера используется и как измерительный интерферометр, формирующий сигнал измерительной информации. При этом для определения расстояний используется то обстоятельство, что разностная частота между соседними продольными модами резонатора является функцией его длины:

$$\Delta\nu = c/(2L),$$

где $\Delta\nu$ – разностная частота; L – длина резонатора; c – скорость света в резонаторе.

Таким образом, при перемещении одного из зеркал на измеряемое расстояние значение разностной частоты изменится и перемещение ΔL может быть определено как

$$\Delta L = 2L^2 \Delta F / c,$$

где ΔF – изменение разностной частоты.

Основным достоинством таких квантовых интерферометров является то, что измерение линейных размеров сводится к автоматическому измерению частоты с высокой точностью. Для квантовых интерферометров с гетеродинированием частот необходим одномодовый двухчастотный режим генерации лазера.

На рис. 7.6 представлена типовая схема квантового интерферометра для измерения длин. Одно из зеркал резонатора 10 является частично прозрачным и закрепляется неподвижно, а другое – непрозрачное зеркало 3 – имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси резонатора. Зеркала могут быть как плоскими, так и сферическими, а расстояние между ними ограничивается потерями в резонаторе. Диафрагма 2 с регулируемым диаметром отверстия используется для получения одномодового режима генерации лазера. Через зеркало 10 и оптическую систему 9 излучение лазера попадает на фотодетектор 7, в котором возникает электрический сигнал с частотой, равной разностной частоте продольных мод лазера, соответствующей измеряемому расстоянию. Этот сигнал поступает на усилитель 6 и измерительное устройство – частотомер 5.

Интерферометры с лазерными источниками излучения. В отличие от рассмотренных квантовых интерферометров, где измерение основано на использовании процессов, происходящих в резонаторе лазера, интерферометры с лазерными ис-

точниками обеспечивают измерение при использовании лазера только как источника излучения.

Такие измерители состоят из источника излучения (лазера), оптического устройства – интерферометра, формирующего сигнал измерительной информации, а также, как и другие измерители, включают в себя электронное устройство обработки и индикации результатов измерения. Для устранения влияния излучения, отраженного от интерферометра обратно в лазер, на его характеристики в таких измерителях предусмотрена оптическая развязка резонатора лазера и интерферометра, которая обычно осуществляется поляризационными элементами или путем разнесения мест деления и наложения интерферирующих пучков. Чувствительность к направлению изменения оптической длины почти у всех приборов достигается построением схем с двумя интерференционными картинками, сдвинутыми друг относительно друга на четверть интерференционной полосы.

Интерферометры с лазерными источниками излучения достаточно хорошо разработаны и обладают большой универсальностью, что является причиной их широкого применения. Процесс измерения величины линейного перемещения интерференционным методом заключается в определении числа длин волн (или долей длины волны) излучения лазера, укладываемых на измеряемом отрезке, и числа интерференционных полос, проходящих через поле зрения регистрирующего прибора при перемещении объекта, изменение положения которого контролируется.

Перевод полученного результата в метрические единицы осуществляется умножением его на значение длины волны используемого лазера. В качестве источников излучения наиболее широко применяются одночастотные лазеры светового диапазона (в основном гелиево-неоновые) благодаря хорошей воспроизводимости длины волны излучения от образца к об-

разцу, достаточно малому значению длины волны, обеспечивающему высокую точность измерителя, и большому сроку службы лазера. Важно и то, что при работе с такими лазерами появляется возможность визуальной настройки прибора, а также упрощается выбор регистрирующих фотоприемников.

В качестве оптического устройства наиболее широко применяется интерферометр Майкельсона и его модификации.

Голографические измерительные преобразователи. Голографические методы обработки измерительной информации находят широкое применение при построении измерительных преобразователей (датчиков) положения, линейных размеров, формы, а также деформации и скорости перемещения объектов. Перспективность применения этих методов объясняется тем, что информация о геометрических параметрах и физическом состоянии объекта непосредственно и полно выражается в световых полях, рассеянных этим объектом.

Измерительная информация заключена во всех характеристиках отраженной объектом световой волны: амплитуде, фазе, длине волны, а также ее поляризации. Существенной особенностью задачи контроля геометрических параметров объектов при этом является необходимость регистрации и обработки многомерных входных сообщений, содержащихся в световых полях или изображениях объектов. Эти сообщения отличаются высокой информативностью, причем повышение требований к точности и быстродействию измерительной системы приводит к необходимости увеличения количества принимаемой и обрабатываемой информации.

Поэтому применение обычных оптических методов обработки измерительной информации с одномерным кодированием электрических сигналов, вырабатываемых фотоэлектрическим преобразователем датчика в процессе сканирования изображения контролируемого объекта, либо не-

достаточно эффективно, либо вообще не решает поставленной задачи.

Голограмма благодаря ее огромной информационной емкости, избыточности и помехоустойчивости оказывается незаменимой при построении измерительных преобразователей для контроля и измерения геометрических параметров и формы объектов.

Контроль геометрических параметров объектов с необходимыми эффективностью, точностью и быстродействием возможен при использовании методов многомерного оптического кодирования измерительной информации. Такое кодирование осуществляется в оптической схеме датчика, т.е. самого "узкого" звена системы, каким обычно является фотоэлектрический преобразователь, что исключает источники потерь измерительной информации и улучшает метрологические характеристики измерительного преобразователя в целом.

Под многомерным оптическим кодированием следует понимать преобразование входного оптического изображения или световых полей объекта, переносящих изображение, в другое оптическое изображение или другие световые поля, наилучшим образом соответствующие возможностям измерения и передачи полезной информации.

Оптическое кодирование может быть непрерывным (аналоговым) или дискретным (цифровым). В последнем случае в дополнение к уже перечисленным операциям оптическое кодирование должно включать квантование изображения или световых полей объекта, т.е. разделение на ряд отличных друг от друга в пространстве по яркости или по иному признаку дискретных элементов, каждому из которых может быть приписан соответствующий кодовый знак. Таким образом, под цифровым многомерным кодированием надо понимать квантование входного изображения или световых полей объекта и последовательное пространственное пере-

распределение элементов квантования по определенному закону (коду).

Цифровое оптическое кодирование дает возможность получить результат измерения в сжатой цифровой помехоустойчивой форме и исключить процесс развертки изображения или световых полей с целью преобразования их в одномерный электрический сигнал. При этом роль фотоэлектрического преобразователя датчика сводится лишь к считыванию результатов измерения, полученных в оптике датчика в виде пятен светового кода. Рассмотрение свойств голографического процесса показывает, что голограмма может быть идеальным элементом для создания кодирующего звена, реализующего метод многомерного оптического кодирования измерительной информации.

Для создания голографического цифрового кодирующего фильтра необходимо и достаточно зарегистрировать на каком-либо фоточувствительном материале голографическое поле или несколько полей при закодированном опорном источнике, причем каждому элементу квантования зоны измерения должен соответствовать свой код опорного источника. Закодированный опорный источник в простейшем случае можно представить в виде совокупности ярких светящихся точек, расположенных в местах пересечения двумерной сетки. Присутствие яркого пятна в данной точке соответствует единице в двоичной системе исчисления, а отсутствие пятна – нулю.

Полученный таким образом голографический цифровой кодирующий фильтр при его облучении в процессе измерения сигнальной волны, рассеянной объектом, восстановит в плоскости входного зрачка фотоэлектрического преобразователя световое изображение того кода, который соответствует результату измерения.

Другой метод цифрового многомерного кодирования основан на свойстве голограммы изменять форму и координа-

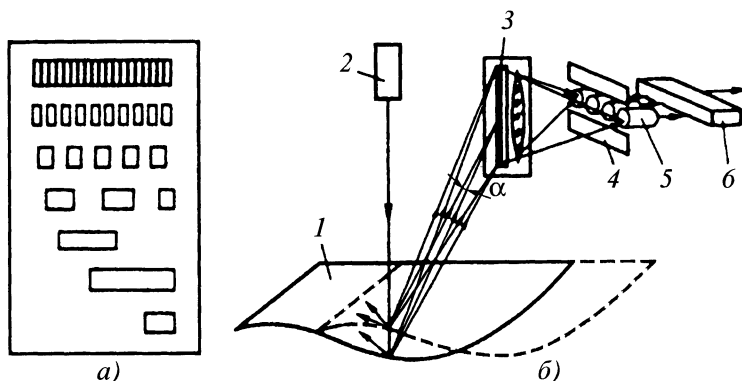


Рис. 7.7. Оптическая схема датчика положения

с голограммой кодовой маски (для случая диффузно отражающего объекта):

а – кодовая маска; *б* – оптическая схема датчика; *1* – объект; *2* – лазер; *3* – голограмма; *4* – щелевая диафрагма; *5* – фотоприемники; *6* – усилители-формирователи

ты восстановленного изображения в зависимости от положения восстанавливающего источника. При изменении координат восстанавливающего источника изображение будет перемещаться. Если закодировать положение восстановленного изображения, то можно определить координаты восстанавливающего источника.

Первый метод цифрового кодирования был положен в основу построения голографических датчиков положения, размеров и формы объектов с корреляционной обработкой измерительной информации, а второй метод – в основу построения датчиков с голограммой кодовой маски. Рассмотрим более подробно принцип построения и функционирования этих датчиков.

Датчики с голограммой кодовой маски. Принцип работы этих датчиков основан на свойствах голограммы менять пространственное положение восстановленного изображения пропорционально перемещению восстанавливающего источника, которым служит световое пятно, создаваемое лазером на поверхности контролируемого объекта. На голограмме предварительно в процессе градуировки записывается изображение кодовой маски, представляющей собой транспарант с про-

зрачными и непрозрачными участками, расположенными в двоичном кодовом порядке, причем прозрачные участки соответствуют значащим разрядам кода.

Отраженный от контролируемого объекта свет дифрагирует на элементах голограммы и восстанавливает в плоскости фотоэлементов изображение кодовой маски. С помощью диафрагмы осуществляется выбор из набора кодов, содержащихся в изображении кодовой маски, одного кода числа, равного результату измерения. При изменении положения объекта изменяются также пространственные координаты светового пятна на его поверхности и угол падения на голограмму восстанавливающей световой волны, что приводит к смещению изображения кодовой маски в плоскости фотоэлементов. При этом диафрагма из набора кодов выделит код числа, соответствующий новому положению объекта, фотоэлементы преобразуют световое изображение кода в его электрический аналог, обработка которого может осуществляться на ЭВМ.

Принцип работы датчика с голограммой кодовой маски применительно к объектам с преобладанием диффузной составляющей в отраженном свете можно пояснить с помощью рис. 7.7.

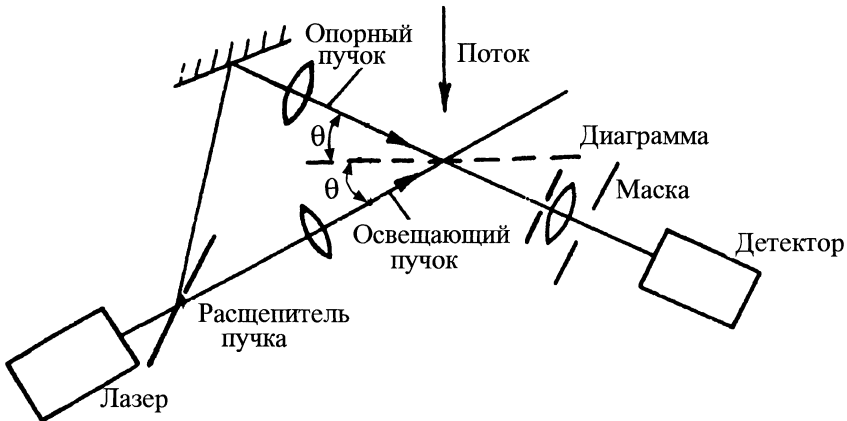


Рис.7.8. Система с гетеродинированием излучения, рассеянного вперед

Контролируемый объект 1 освещается сфокусированным лучом лазера 2. На пути отраженного от объекта пучка света устанавливается голограмма 3 с предварительно записанным изображением кодовой маски. Число разрядов, дискретность, размеры кодовой маски определяются необходимым диапазоном и точностью измерения, а также конкретными геометрическими соотношениями схемы записи и измерения. Горизонтальное перемещение объекта приводит к изменению положения отражающей поверхности по вертикали в месте падения луча лазера (объект показан в виде изогнутой полосы или листа).

Пространственное смещение светового пятна и изменение угла падения на голограмму отраженной световой волны вызывает пропорциональное смещение изображения кодовой маски в плоскости восстановления за голограммой, таким образом, любому положению поверхности объекта соответствует свое положение кодовой маски в плоскости восстановления.

Для пространственной селекции изображения кода одного числа, равного результату измерения, датчик содержит щелевую диафрагму 4, а за диафрагмой – фотоприемники 5 (по числу разрядов кода), осуществляющие преобразование светового изображения кода в электрический сигнал. С выхода усилителей-формирова-

телей 6 сигнал подается в электронные блоки для обработки.

Лазерные измерители скорости. Лазерные измерители скорости дают возможность проведения бесконтактных высокоточных измерений скорости тел в твердом, жидком и газообразном состояниях. Наибольшее развитие получили лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС).

Принцип действия ЛДИС основан на том, что при движении объекта свет, отражающийся от него, изменяет свою частоту в соответствии с соотношением

$$v = v_0(1 \pm v_n / c) = v_0 + v_d,$$

где v – частота волны отраженного света, регистрируемая неподвижным наблюдателем, v_0 – частота волны падающего излучения, v_n – скорость движения объекта, причем $v_n \ll c$, v_d – доплеровский сдвиг частоты. Значение доплеровского сдвига v_d для He-Ne-лазера с $\lambda = 0,6328$ мкм при скорости движения объекта $v_n = 10$ м/с составляет ~ 16 МГц, что можно легко зарегистрировать при смещении волн, претерпевших и не претерпевших отражение от движущегося объекта. В общем случае, когда относительно друг друга движутся источник излучения, например отражающая поверхность, и приемник излучения, доплеровский сдвиг частоты составляет

$$v_d = \frac{1}{2\pi} \bar{K} (\bar{v}_и - \bar{v}_{пр}),$$

где \bar{K} – волновой вектор, направление которого совпадает с нормалью к фазовому фронту волны; $\bar{v}_и$ и $\bar{v}_{пр}$ – вектора скорости источника и приемника излучения соответственно.

Лазерная анемометрия. Имеется множество оптических схем ЛДИС потоков жидкостей и газов, которые отличаются методами формирования опорного луча, приема оптического излучения и обработки доплеровского сигнала и методами регистрации рассеянного излучения.

Исторически первая схема ЛДИС была основана на методе гетеродинирования (рис. 7.8). Лазерный пучок в этой схеме проходит через поток и свет, рассеянный частицами, находящимися в потоке, попадает на фотодетектор, расположенный под некоторым углом по отношению к направлению распространения исходного пучка. В результате эффекта Доплера рассеянное излучение сдвигается по частоте. На фотодетектор попадает также опорный пучок, прошедший через область потока. Для сбора света используют линзу, а маска и диафрагма служат для того, чтобы ограничить область наблюдения. Интенсивность опорного пучка и рассеянного света, попадающего на детектор, должны быть приблизительно одинаковыми, в противном случае сигнал биений на выходе фотодетектора будет слишком мал.

В рассматриваемом случае доплеровский сдвиг частоты будет равен

$$v_d = 2v \sin \theta n_{cp} / \lambda,$$

где v – абсолютное значение скорости потока; n_{cp} – показатель преломления среды; λ – длина волны излучения лазера в вакууме.

Применение ЛДИС для измерения скоростей потоков жидкостей и газов или, как принято говорить, в анемометрии, обеспечило существенные преимущества по сравнению с традиционными системами, где обычно в качестве первичных пре-

образователей используют датчики, вносимые в поток. Методы лазерной анемометрии обеспечивают измерение скорости в широких пределах, вплоть до сверхзвуковых скоростей ~ 1000 м/с и выше, такими методами можно проводить дистанционные измерения на расстояниях до нескольких километров от измерительной установки, наконец, лазерные анемометры дают возможность измерения локальных скоростей в выделенных точках потока, что особенно важно при исследовании турбулентных и пристеночных течений. Эти преимущества в сочетании с высокой точностью измерительных устройств обусловили быстрое развитие и практическое внедрение лазерной анемометрии.

Во всех ЛДИС при измерении скорости потока происходит сравнение частоты опорного луча излучения с частотой излучения, рассеянного частицами, взвешенными в жидкости или газе и движущимися в потоке. В идеальном случае эти частицы должны иметь микроскопические размеры и плотность, близкую к плотности среды, в которую они погружены. С целью усиления отраженного луча лазера в движущийся поток прозрачной жидкости или газа искусственно вводят микрочастицы, например, полистироловые сферы с диаметром ~ 1 мкм.

7.4. СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Принцип действия рефлексометрических датчиков малых перемещений основан на измерении световой энергии, попадающей из одного волоконного канала в другой за счет отражений от контролируемой поверхности и пропорциональной расстоянию от объекта до торца датчика, выполненного в виде концентрических пучков волокон (рис 7.9, а и б). Излучаемый источником модулированный свет после отражения от объекта возвращается к фотодиоду.

В электронной схеме прибора происходит усиление и сравнение сигналов.

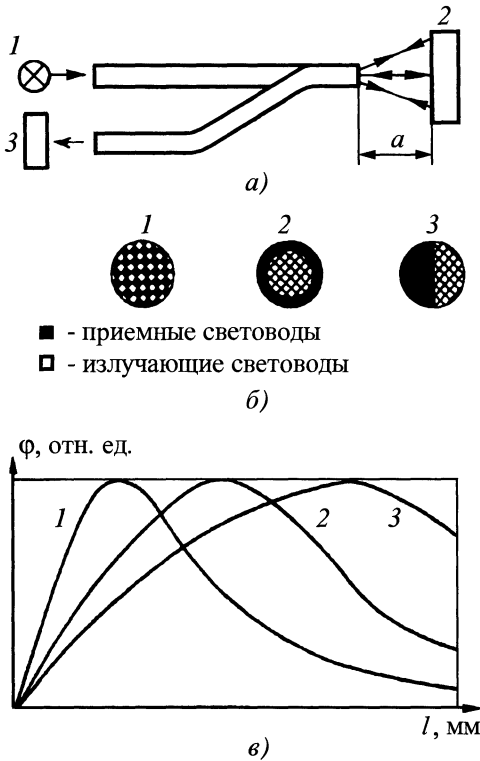


Рис. 7.9. Волоконно-оптический измеритель зазоров и смещений:

a – оптическая схема: 1 – источник света; 2 – объект; 3 – фотоприемник; l – расстояние между объектом и торцом световода; б – схемы укладки волокон: 1 – регулярная; 2 – кольцевая; 3 – ступенчатая; в – зависимость сигнала датчика от расстояния до объекта (l , 2 и 3 соответствуют обозначениям укладки; ϕ – интенсивность сигнала

Подобная схема позволяет уменьшить погрешность измерения, возникающую при случайных вариациях отражательной способности поверхности объекта.

Подобные датчики могут успешно работать в воздухе и в любой достаточно прозрачной и слаборассеивающей свет жидкости, в том числе различных агрессивных средах. Погрешность измерения 1 ... 5 мкм при диапазоне измерения 0,1 ... 5 мм.

Если зафиксировать расстояние от датчика до контролируемого объекта, то

по изменению величин сигналов фотодиодов можно судить о шероховатости его поверхности, так как ее изменение приводит к перераспределению отраженного потока в пространстве за счет изменения индикатрисы рассеяния.

Если размер поперечного сечения волокон d сравним с длиной волны λ , то в равномерной освещенности выходных торцов волокон наблюдаются, так называемые, модовые картины – симметрично чередующиеся светлые и темные пятна, разные по форме и цвету в различных волокнах. Это объясняется тем, что полное внутреннее отражение наблюдается только при некоторых дискретных значениях углов отражения, называемых характеристическими. Каждому такому значению соответствует определенный тип волн (мода) и способ их распространения, число которых увеличивается с возрастанием диаметра волокон.

При $d \leq \lambda$ по волокну может распространяться только одна мода (один тип колебаний). Такие волокна принято называть *одномодовыми*. Они находят применение, главным образом, в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). В этих световодах резко уменьшаются потери на поглощение излучения из-за того, что оно фактически полностью выходит из световода и, оставаясь связанным с ним, распространяется по воздуху вдоль него, как по своеобразной направляющей. В одномодовых ВОЛС сохраняется поляризация и когерентные свойства света, ввод которого осуществляют с помощью микрообъектива.

Перспективно использование оптических волноводов в волоконных интерферометрах.

На рис. 7.10, а приведена схема простейшего двухволоконного интерферометра для измерения сверхмалых деформаций и амплитуд вибраций.

Лазерный луч попадает в световод 1 и в элементе связи 2 поровну делится между световодами 1 и 3. В выходной эле-

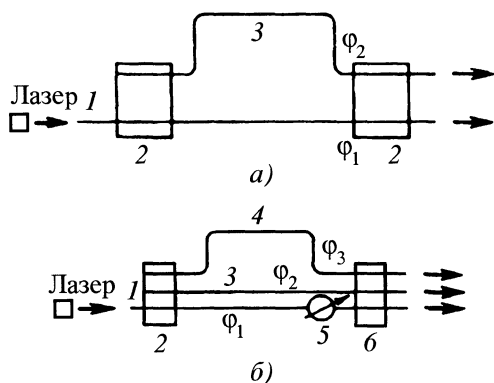


Рис. 7.10. Схемы волоконно-оптических интерферометров для контроля деформаций и амплитуд вибраций:

а – двухволоконного; *б* – трехволоконного; 1, 3, 4 – одномодовые световоды; 2, 6 – элементы связи волокон; 5 – настроочный элемент

мент связи, играющий роль фазового анализатора, приходят волны с одинаковыми амплитудами, но различными фазами. Обычно световод 1 изолируется от внешних воздействий и $\varphi_1 = \text{const}$. Световод 3 помещается в зону контроля и подвергается нагреву или деформации (в последнем случае он жестко крепится к объекту контроля). При этом меняется фаза φ_2 проходящей через него волны и соответственно яркость картины, возникающей при интерференции лучей, выходящих из световодов 1 и 3. Недостатком данной схемы является невозможность определения знака изменения фазы φ_2 , т.е. знака внешнего воздействия.

Для количественных измерений удобнее схема трехволоконного интерферометра (см. рис. 7.10, б). Луч лазера распределяется между световодами 1, 3, 4 в элементе связи 2. Световод 4 подвергается внешнему воздействию, изменяющему фазу φ_3 на входе фазоанализатора б. Световоды 1 и 3 изолированы от внешних воздействий. Настроочный элемент 5 может изменять натяжение волокна световода 1, а следовательно, значение φ_1 . По распределению интенсивностей на выходе волокон можно определить величину и знак фазы, т.е. полностью определить воз-

действие. С помощью такого интерферометра можно регистрировать деформации порядка 0,01 мкм.

7.5. СРЕДСТВА ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

Приборы оптической толщинометрии по принципу действия подразделяют на оптико-геометрические (триангуляционные, фокусируемые, светового сечения), спектрофотометрические, а также интерферометры и эллипсометры. Они аналогичны соответствующим приборам контроля геометрии, описанным выше. Отличаются наличием второго измерительного канала, т.е. в использовании двухстороннего способа измерения.

Действие **спектрофотометрических** толщиномеров основано на законе Бугера

$$D_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} = k l,$$

где D_λ – оптическая плотность прозрачного объекта; I_λ и $I_{0\lambda}$ – спектральные интенсивности излучения до и после прохождения объекта толщиной l , мм; k – коэффициент спектральной абсорбции (поглощения) материала изделия, мм^{-1} .

Обычно выбирают область длин волн, соответствующих резонансному поглощению света (полосы поглощения) в материале. Для многих полимеров (полиэтилен, полипропилен и др.) характерна, например, линия поглощения на $\lambda = 2,35$ мкм. В приборе используют два сменных фильтра – один соответствует полосе поглощения, другой – области длин, где поглощение мало зависит от толщины пленки. Измеряя отношение сигналов, корректируют мультипликативную погрешность за счет неселективного ослабления света в пленке, например из-за наличия рассеивающих включений.

В режиме на отражение в дальнем ИК-диапазоне возможно измерение толщины коррозионных фосфатных покрытий на листах металла для автомобильной и других отраслей.

Лазерная эллипсометрия основана на анализе изменения состояния поляризации света, отраженного от поверхности изделия. Метод позволяет контролировать с высокой точностью толщины ($10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-7}$ мм) и показатели преломления (до 10^{-5}). Применение лазеров позволило резко повысить чувствительность и информативность эллипсометрического метода, так как они определяются главным образом монохроматичностью и степенью направленности источника излучения.

На контролируемый объект направляют под некоторым углом i_0 монохроматический плоскополяризованный луч. Вектор амплитуды электрического поля может быть разложен на составляющие E_p и E_s , ориентированные соответственно параллельно и нормально к плоскости падения. После отражения (или прохождения) луча от объекта его составляющие изменяют свою амплитуду и фазу и он становится эллиптически поляризованным, т.е. конец его описывает эллипс в плоскости, нормальной к направлению распространения.

Для наиболее часто встречающихся на практике случаев прозрачной диэлектрической пленки на поверхности полупроводника степень этой эллиптичности ρ является функцией толщины пленки d_1 , показателей преломления пленки и подложки n_1 и n_2 , показателя поглощения подложки α_2 , длины волны лазера λ , угла падения луча на образец i_0 , т.е.

$$\rho = \rho(n_1, n_2, \alpha_2, d_1, \lambda, i_0).$$

7.6. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ И ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ

Телевизионные профилометры

Способ шаблона. Шаблон из прозрачного материала, имеющий форму, обратную форме контролируемой детали, устанавливается перед ФЭУ на пути светового луча от просветной трубки таким образом, чтобы между краями шаблона и

изделия образовался просвет заданного размера. Когда бегущий луч будет пересекать просвет, на выходе ФЭУ возникнет сигнал, пропорциональный этому зазору.

Способ с калибром. В этом способе, являющемся одним из первых известных способов, используется раздвоение бегущего луча. Один из лучей с помощью полупрозрачного зеркала проецируется на контролируемую деталь, другой – на калибр. За деталью и калибром помещаются собирающие линзы, направляющие световые лучи на ФЭУ. Если деталь и калибр совершенно одинаковы, то сигналы, снимаемые с обоих ФЭУ, будут идентичны, а разность их равна нулю. При каком-либо отклонении контролируемой детали от нормы на выходе ТА появится сигнал.

Способ с раздвоением изображения. Способ с раздвоением изображения может применяться при контроле некоторых изделий, профиль которых составлен из прямоугольных форм. Большим преимуществом способа является то, что он не требует никакой другой точной установки изделия в заданное положение, кроме ориентировки относительно одной или, в некоторых случаях, двух осей вращения.

Раздвоенное изображение контролируемого изделия проецируется на фотослой трубки (рис. 7.11, а). Размер просвета между краями раздвоенного изображения h при определенном сдвиге изображений друг относительно друга, определяемом оптическим устройством, зависит от поперечных размеров изделия. При переходе от контроля изделия на участке 2 к контролю на участке 1 необходимо изменять величину раздвоения, добиваясь получения одного и того же значения просвета (рис. 7.11, б).

Дальнейший процесс получения контрольного видеосигнала и его обработка аналогичны рассмотренным способам. Точность контроля при данном способе определяется теми же факторами, что и в способе с шаблоном.

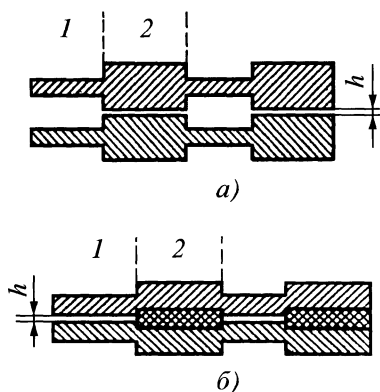


Рис. 7.11. Способ контроля формы изделия с раздвоением изображения при контроле:
a – на участке 2; *б* – на участке 1

Растровый способ контроля. Данный способ контроля применим только к изделиям, контуры которых образованы прямоугольными формами. Отличительная его особенность заключается в исполнении раstra в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных полос, размещаемого в плоскости фотослоя трубки, на который проецируется изображение контролируемого изделия.

Вместо передающей трубки может использоваться просветная трубка системы бегущего луча или даже обычная приемная трубка. Контроль формы изделия в соответствующем его сечении сводится к автоматическому подсчету числа импульсов, возникающих при сканировании электронным лучом различных участков раstra, не закрытых изображением изделия, и сравнению этого числа с заданным.

Данный способ позволяет значительно повысить точность контроля при проецировании на растр только краев изображения изделия или путем проецирования оптически раздвоенного раstra на края детали в случае использования установки с бегущим лучом, как показано на рис. 7.12. Светящаяся точка, образующаяся на поверхности люминесцирующего слоя кинескопа 1, совершает колебания по пилообразному закону вдоль прямой $O_1 - O_2$ с частотой 30 Гц. Световой поток от све-

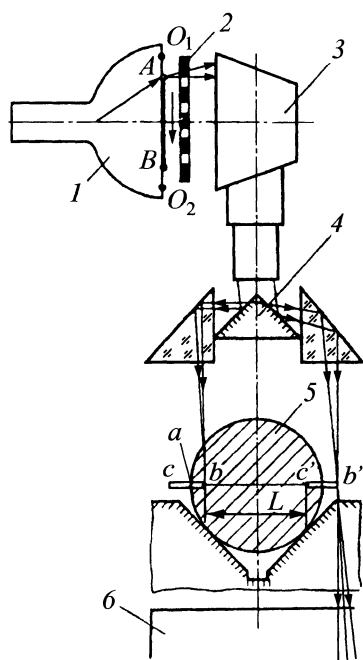


Рис. 7.12. К способу контроля формы изделия с помощью раstra:
 1 – кинескоп; 2 – линейчатый растр;
 3 – оптическое устройство; 4 – призматическая насадка; 5 – объект; 6 – фотоумножитель

тящейся точки проходит через линейчатый растр 2 и оптическое устройство 3, снабженное специальной призматической насадкой 4, в которой он раздваивается на две части. Один из потоков фокусируется в точке *c*, а другой в точке *c'*, лежащих в плоскости контролируемого сечения детали 5. Для повышения точности контроля растр проецируется на деталь с уменьшением.

Контроль детали сводится, в сущности, к измерению суммы расстояний, проходимых световым лучом на участках *ac* и *c'b'*, т.е. на тех участках, которые не преграждаются изделием и свободно пропускают световые лучи к фотоумножителю 6.

Вследствие того, что световой поток модулирован, на выходе умножителя возникают импульсы напряжения, по числу которых и определяется сумма расстояний *ac + c'b'*. При настройке оптической системы необходимо добиться, чтобы свето-

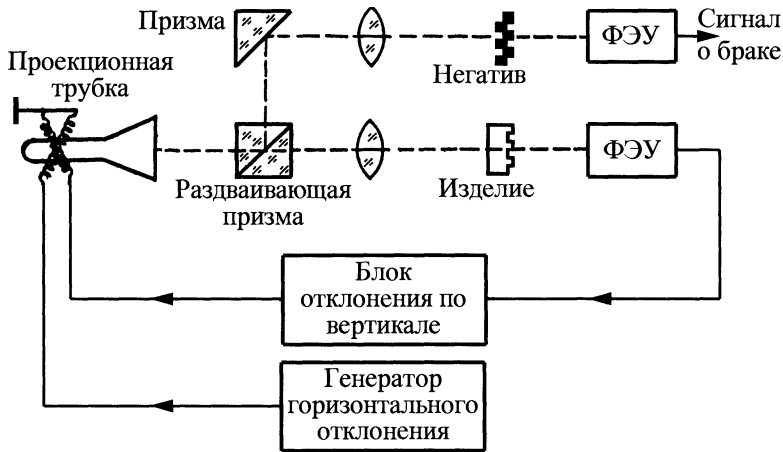


Рис. 7.13. Иллюстрационная схема контроля формы изделия с помощью следящей развертки

вые пучки поочередно попадали на свободные от изделия участки, так как только в этом случае импульсы могут быть просуммированы.

Расстояние между растроми L определяется по шкале микрометрического винта механизма перемещения оптического устройства 3 и для определенных изделий известно заранее. Для отбраковки изделия или сигнализации о выходе его размера за пределы допуска используется специальное счетно-индикаторное устройство.

К достоинствам такого способа контроля, помимо независимости точности контроля от неравномерности скорости и нестабильности амплитуды отклонения электронного луча, следует отнести отсутствие зависимости точности контроля от перемещения детали поперек линий растра. С другой стороны, существенным недостатком растрового способа контроля является необходимость весьма точной фиксации краев изображения параллельно линиям растра.

На базе указанного способа была разработана установка, предназначенная для контроля цилиндрических тел и резьбы по среднему диаметру по всей длине свинчивания. С помощью этой установки можно

контролировать изделия диаметрам до 30 мм и длиной до 300 мм при абсолютной погрешности около 0,015 мм.

Способ следящей развертки. Во всех предыдущих способах контроля точность контроля зависит от числа строк, проходящихся на единицу длины контурной линии изделия. Однако даже при большом числе их точность контроля заметно снижается при малых углах наклона контурной линии к направлению развертки. Увеличение числа строк связано с увеличением времени, необходимого на проверку одного изделия, и, следовательно, приводит к снижению скорости контроля на потоке. Для сохранения заданной скорости контроля требуется увеличение скорости сканирования луча; но при этом за счет послесвечения люминофора трубки увеличивается размытие светового пятна, снижающее точность контроля.

Всех указанных недостатков лишен способ следящей развертки по контуру, который, кроме того, имеет еще ряд дополнительных преимуществ, связанных с тем, что точность контроля не зависит от изменения скорости развертки, послесвечения трубки и ширины полосы канала

усиления. Этот способ осуществляется с помощью контурного слежения раздвоенными световыми лучами (рис. 7.13).

Бегущий луч, пройдя через раздваивающую призму и оптические элементы схемы, попадает одновременно на негатив эталонного контура изделия в виде непрозрачной линии, имеющей толщину, равную допуску, и на край контролируемого изделия. В исходном положении луч находится в левом верхнем углу раstra (рис. 7.14). Под воздействием отклоняющего тока по строкам оба луча начинают перемещаться в горизонтальном направлении до тех пор, пока рабочий луч не встретит на своем пути контролируемое изделие. Как только луч начнет задерживаться контуром изделия, ФЭУ, размещенный за изделием, начнет вырабатывать постоянное напряжение, заставляющее луч подняться вверх (или опуститься вниз); в результате луч обходит контур изделия.

Если при этом второй, контрольный луч, совершенно точно повторяющий перемещение рабочего луча, будет все время следовать по линии допуска, то на ФЭУ, находящийся за негативом, свет не пройдет. При отклонении изделия от нормы контрольный луч сойдет с линии допуска и появится сигнал, извещающий о браке.

Движение светового луча по контуру изделия достигается с помощью усилителя, работающего на разбалансированный мост, в диагональ которого включена катушка отклонения по вертикали.

На макете устройства, построенного с использованием рассмотренного способа, были проконтролированы различные

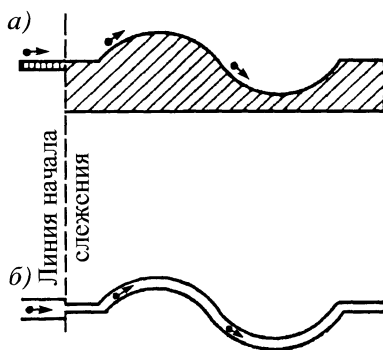


Рис. 7.14. Ход рабочего и контрольного лучей в способе со следящей разверткой:

а – рабочий луч; б – контрольный луч

сложные формы изделий. На рис. 7.15 изображен чертеж поверхности детали с указанием отдельных углублений в микрометрах и осциллограмма следящей развертки, которая достаточно точно воспроизводит чертеж.

Способ следящей развертки позволяет контролировать форму изделий и в виде замкнутых контуров. Этого можно достигнуть, применяя две отдельные просветные трубки, горизонтальное отклонение лучей в которых осуществляется от одного общего генератора, или применяя одну двухлучевую трубку с раздельным отклонением лучей по вертикали.

Точность контроля рассматриваемого способа определяется точностью установки изделия относительно допусковой дорожки, изготовления самой допусковой дорожки и стабильностью усилителя вертикального отклонения и составляет приблизительно 10 мкм.

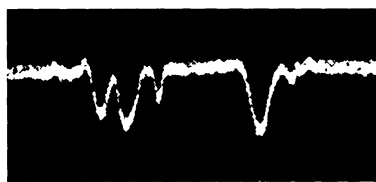
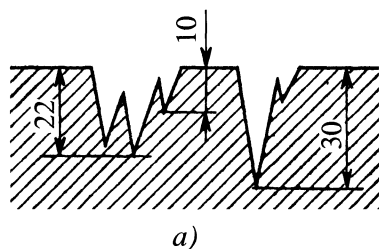


Рис. 7.15. Результаты экспериментальной проверки способа следящей развертки:

а – чертеж поверхности детали; б – осциллограмма

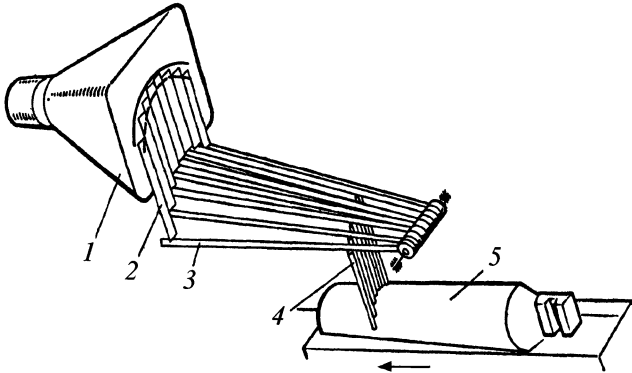


Рис. 7.16. Иллюстрационная схема электронно-оптического способа контроля профиля изделий:
1 – трубка; 2 – шторки; 3 – рычаги; 4 – стержни; 5 – изделие

Электронно-оптический способ.

Схема этого способа приведена на рис. 7.16, из которого следует, что данный способ по принципу действия совпадает со способом контроля формы при помощи допусковых линий. Для переноса профиля изделия 5 в плоскость экрана просветной трубки 1 используется серия тонких, вплотную прилегающих друг к другу стержней 4, располагающихся по профилю изделия, и рычагов 3, переносящих профиль на шторки 2. При вертикальном сканировании экрана трубки будет возникать импульсы, обусловленные пересечением допусковых линий и краев шторок – при одном импульсе в данном месте изделие выходит за верхний допуск, при двух находится в норме, при трех выходит за нижний допуск. Перемещая изделие вдоль оси, можно контролировать его профиль в любом сечении. Основным недостатком данного способа является дискретный характер профиля, не позволяющий проводить контроль с высокой точностью.

Триангуляционный способ контроля проката прямоугольного сечения дает возможность контролировать толщину сечения проката в виде прямоугольника в процессе горячей прокатки, независимо от вибраций прокатываемого металла.

Если направить луч лазера под углом 45° на верхнюю поверхность проката, то,

отразившись от нее, луч попадет через оптическую систему на фотослой трубки ТД в точку O_1 (рис. 7.17). Если теперь толщина проката увеличится, то отраженный луч попадет в точку O_2 . Тогда, исходя из построений рис. 7.17, можно легко найти, что искомая толщина $d = d_0 \pm \frac{x_1 L}{\sqrt{2} f}$,

где d_0 – исходная толщина проката; x_1 – расстояние между точками O_1 и O_2 ; L – расстояние между объективом ТД и местом отражения лазерного луча от поверхности в исходном положении; f – фокусное расстояние объектива ТД.

Для устранения воздействия вибраций аналогичное устройство размещается

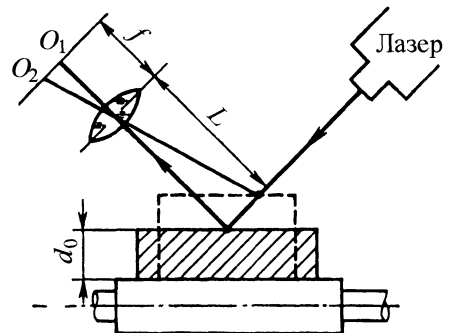


Рис. 7.17. К измерению толщины сечения горячего проката

с нижней стороны проката и тогда толщина $d = d_0 + \frac{L}{\sqrt{2}f}(x_1 \pm x_2)$ независима от

вибраций, поскольку излишнее приращение значения x_1 будет скомпенсировано таким же приращением значения x_2 .

Преобразование отрезков x_1 и x_2 в импульсы производится путем одностороннего сканирования вдоль линии O_1-O_2 , причем фронт импульса задается синхроимпульсом, а срез – положением точки O_2 . На выходе ТА установлен самописец, регистрирующий в динамике весь процесс проката.

Данное устройство может контролировать с точностью 2,5 мм прокат толщиной 130 ... 230 мм, имеющий неровности до 1 мм, температуру 1000 ... 1150 °С и перемещающийся со скоростью 1 ... 2 м/с.

Для повышения контраста светового пятна на фоне раскаленного металла оптическая система снабжена узкополосным фильтром на длину волны 632,8 нм (используется гелий-неоновый лазер).

Способ контроля с помощью светового пятна. Два тонко сфокусированных в одну точку лазерных луча направляются под разными углами на контролируемую поверхность предмета 1, который плавно перемещают по направлению измеряемого сечения (рис. 7.18). При этом, из-за кривизны предмета, расстояние между лазерными головками 2 и поверхностью будет изменяться, что приведет к увеличению размеров светового пятна на поверхности. После преобразования изображения светового пятна в видеосигнал с помощью ТД 3 видеосигнал поступает в счетно-измерительное устройство 4, где определяются размеры пятна и вырабатывается сигнал ошибки. С помощью этого сигнала приводится в действие привод 5, перемещающий каретку с лазерными головками 6 до получения минимальных размеров пятна на контролируемой поверхности.

Полученные данные по перемещению лазерных головок подаются к индикатору 7, на который также выводятся

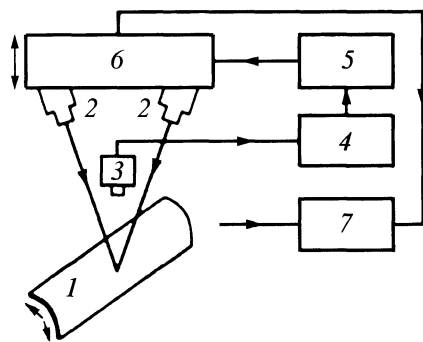


Рис. 7.18. К способу контроля криволинейной поверхности предмета:
1 – объект; 2 – лазерные головки; 3 – ТД;
4 – счетно-измерительное устройство;
5 – привод; 6 – каретка; 7 – индикатор

координаты контролируемой в данный момент точки поверхности. Если снабдить индикатор самописцем, то можно получить документальную запись криволинейности предмета.

Способ со световым сечением. Визуальный вариант. Если на участок поверхности изделия направить узкий щелевидный пучок света, то при наблюдении под некоторым углом получающегося светового пояса можно увидеть профиль данного участка изделия. При освещении всего периметра изделия будет виден полный его профиль. На рис. 7.19 изображено взаимное расположение изделия и элементов аппаратуры при контроле профиля пера лопатки турбины. Полученное световое сечение переносится с помощью объектива на экран и сравнивается там с предварительно нанесенным эталонным контуром.

Расчеты показывают, что в рассматриваемом способе между наблюдаемым размером сечения a и его истинным значением b имеется следующая связь:

$$a = b \frac{\sin \beta}{\sin \alpha},$$

где α – угол, образованный плоскостью светового сечения и осью изделия, β – угол между плоскостью светового сечения и плоскостью визирования.

Отсюда следует, что проекция светового сечения будет соответствовать истин-

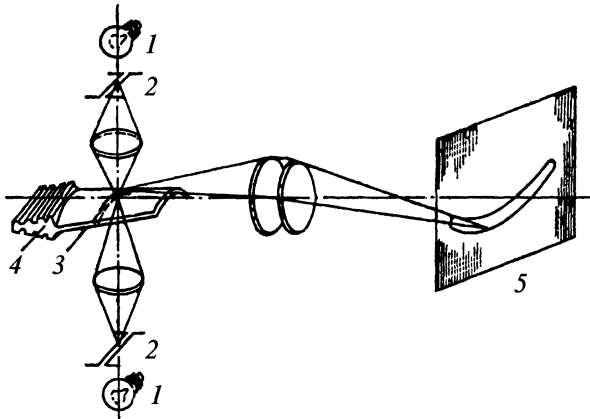


Рис. 7.19. Иллюстрационная схема способа

контроля профиля изделий с помощью светового сечения:

1 – источник света; 2 – щелевая диафрагма; 3 – световой пояс; 4 – изделие; 5 – проекционный экран

ному размеру изделия при условии $\alpha = \beta$.

При чисто оптическом выполнении данного способа возникают большие трудности в случае контроля профиля по замкнутому периметру, и, кроме того, сам контроль может производиться только в непосредственной близости к изделию, что не всегда выполнимо.

Лазерные методы измерения профиля. Среди методов измерения профиля можно выделить следующие: триангуляционный, точной фокусировки, дифракционный и интерферометрический.

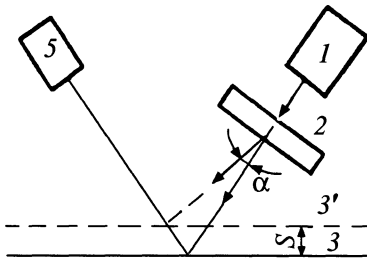


Рис. 7.20. Схема триангуляционного метода измерений:

1 – лазер; 2 – дефлектор; 3, 3' – поверхность изделия; 4 – фотодетектор

Использование **триангуляционного метода** основано на изменении положения отраженного луча лазера в пространстве при перемещении отражающей поверхности (рис. 7.20). Луч лазера 1 проходит через дефлектор 2 и направляется на исследуемую поверхность 3. После отражения луч попадает на фотодетектор 4. Если поверхность займет новое положение 3', излучение попадет на фотодетектор только после отклонения на угол α , значение которого связано со значением перемещения S . Этот метод прост, однако точность его невысока и зависит от качества обработки исследуемой поверхности.

При реализации **метода точной фокусировки** лазерный пучок фокусируется в апертуру точечной диафрагмы, которая совершает колебательные движения (рис. 7.21). С помощью линзы лазерный луч фокусируется в небольшое пятно на поверхности исследуемого объекта, эта же линза используется для собирания излучения, рассеянного поверхностью. Другая линза фокусирует рассеянное излучение на диафрагму, приводимую в колебательное движение с помощью вибратора, который питается от генератора. Излучение,

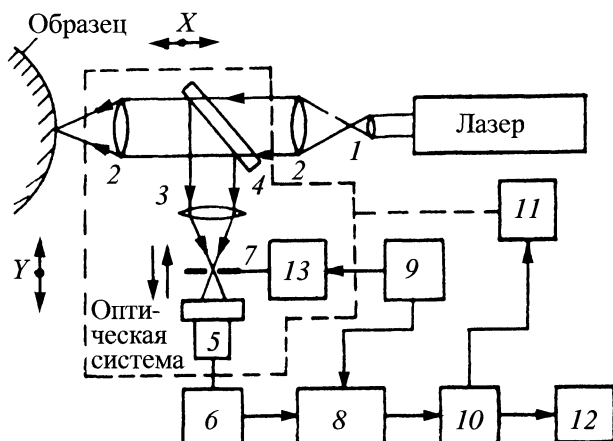


Рис. 7.21. Схема измерения профиля поверхности методом точной фокусировки:

- 1 – коллиматор; 2, 3 – линзы оптической системы; 4 – светоделительная пластина;
 5 – фотодиод; 6 – усилитель; 7 – точечная диафрагма; 8 – синхронный детектор;
 9 – генератор; 10 – усилитель сервосистемы; 11 – сервосистема; 12 – самописец;
 13 – вибратор

прошедшее через эту диафрагму, попадает на фотодиод. Переменная составляющая сигнала на выходе фотодиода усиливается, а затем детектируется синхронным детектором, который "привязан" к управляющему генератору. При смещении исследуемой поверхности от заданного положения на выходе синхронного детектора появляется напряжение, отличное от нуля, знак которого показывает направление перемещения. Под действием этого напряжения сервосистема перемещает исследуемую поверхность или оптическую систему в направлении лазерного луча до тех пор, пока напряжение на выходе синхронного детектора не станет равным нулю. Профиль исследуемой поверхности может быть записан самописцем.

Такие системы позволяют получить контурные карты различных объектов с точностью воспроизведения до 2 мкм. Погрешность измерения составляет 30 ... 100 мкм в зависимости от качества обработки исследуемой поверхности. Процесс измерений может быть автоматизирован. Однако эти

системы имеют и ряд недостатков: сложность контроля полированных поверхностей, необходимость механического перемещения объекта измерений и оптической системы.

Дифракционный метод основан на использовании дифракции луча лазера на щели, образованной эталонной и исследуемой поверхностями. Точность измерений и система обработки результатов измерений аналогичны в этом случае рассмотренным для лазерных дифракционных измерителей размера. Дифракционный метод используют при контроле профиля кромок деталей и образующих поверхностей вращения.

Интерферометрический метод основан на измерении отклонений формы поверхности объекта от базовой плоскости с помощью одного из интерферометров, описанных ранее.

Приборы контроля плоскостности изделий. На рис. 7.22 изображена схема прибора, разработанного в МНПО "Спектр" для бесконтактного контроля

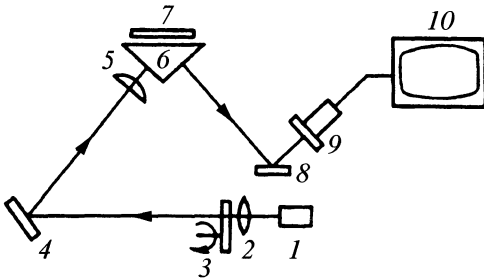


Рис. 7.22. Схема прибора для бесконтактного контроля плоскостности:
 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – рассеиватель;
 4 – зеркало; 5 – коллиimator; 6 – призма;
 7 – контролируемая пластинка; 8 – зеркало;
 9 – телекамера; 10 – телевизор

плоскостности. Принцип работы прибора состоит в интерференционном сравнении исследуемой и эталонной поверхностей. Эталонной поверхностью служит гипотенузная грань призмы.

Контролируемая пластина располагается на трех сферических опорах параллельно эталонной грани с зазором 0,2 ... 0,5 мм. Особенностью прибора является возможность контроля тонких прозрачных пластин, а также шлифованных пластин за счет малых углов падения лучей на объект контроля. Точность измерения (цена одной интерференционной полосы) – 1 мкм для излучения с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм. Размер контролируемой пластины – до 100×100 мм². Контрастное изображение интерферограмм наблюдается на телевизионном мониторе, причем может быть применена система его автоматической обработки на микроЭВМ. Пластина может располагаться вертикально для исключения влияния прогиба.

Лазерный телевизионный интерферометр аналогичного назначения, выполненный по схеме Физо (с нормальным падением лучей на объект), имеет точность до 0,5 мкм.

Голографические и интерферометрические методы контроля формы изделий описаны в главе "Голографические методы контроля".

7.7. ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ИЗДЕЛИЙ

Метод светового сечения профиля был предложен В.П. Линником в 1929 г. Прибор светового сечения представляет собой систему из двух микроскопов: микроскопа, проектирующего изображение светящейся щели на шероховатую поверхность (МП) и микроскопа наблюдения (МН), поэтому первые образцы прибора были названы двойными микроскопами.

В настоящее время приборы светового сечения широко используются в промышленности для измерения параметров шероховатости R_z , R_{max} и S на поверхностях, обработанных плоским шлифованием, плоским фрезерованием и другими видами обработки, при которых значение параметра R_z лежит в пределах 0,5 ... 50 мкм.

Сущность метода заключается в следующем. На шероховатую поверхность под углом α к нормали проецируется изображение узкой освещенной щели. Это промежуточное изображение щели принимает форму профиля поверхности и наблюдается с помощью микроскопа, оптическая ось которого составляет угол β с нормалью к поверхности.

Принципиальная оптическая схема прибора светового сечения представлена на рис. 7.23. Микроскоп МП состоит из источника света 1, конденсора 2, освещающего щель 3, микрообъектива 5 с дополнительной линзой 4. Изображение щели проецируется с уменьшением на исследуемую поверхность 6.

Изображение щели вместе с участком поверхности в виде узкой полосы наблюдается в микроскоп МН, который состоит из микрообъектива 7, дополнительной линзы 8 и окулярного винтового микроскопа 9, в фокальной плоскости которого находится перекрестие и шкала. Оптические характеристики микрообъективов 5 и 7 одинаковы. Обычно к прибору прилагаются три-четыре пары микрообъективов, обеспечивающих измерение параметров

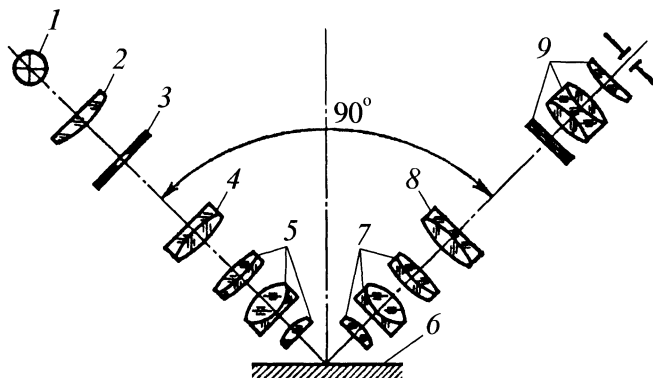


Рис. 7.23. Оптическая схема прибора светового сечения:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – щель; 4, 8 – линзы; 5, 7 – микрообъективы; 6 – исследуемая поверхность; 9 – микрометр

шероховатости Rz и $Rmax$ в диапазоне 0,5 ... 50 мкм.

Увеличение этой системы Γ равно отношению фокусных расстояний компонентов, т.е.

$$\Gamma = f'_2 / f'_1,$$

где f'_1 , f'_2 – фокусные расстояния соответственно микрообъектива и дополнительной линзы.

В фокальной плоскости окуляра оператор измеряет высоту $H_{изм}$ (или координаты точек) профиля, связанную с высотой H (или координатами точек) профиля поверхности в нормальном сечении следующим соотношением:

$$H_{изм} = HB\Gamma,$$

где B – масштаб преобразования профиля поверхности в пространстве предметов MH ; Γ – линейное увеличение системы микрообъектива и дополнительной линзы.

Чтобы определить высоту профиля H (или координаты точек) в нормальном сечении, необходимо результат измерения разделить на $B\Gamma$. Таким образом, под масштабом B преобразования профиля подразумевается отношение высоты наблюдаемого профиля поверхности в пространстве предметов MH к высоте профиля в нор-

мальном сечении.

Масштаб B преобразования профиля, образованного отражением от шероховатой поверхности, равен $2\sin\beta$ и не зависит от угла проекции α .

Значение угла α не влияет на масштаб преобразования профиля, образованного отражением от шероховатой поверхности, однако оно не должно существенно отличаться от значения угла β . Изображение щели от зеркально отражающих поверхностей, например от ступеньки, образованной полированными металлическими поверхностями, от поверхности одноштриховой меры или от верхней поверхности многштриховой меры может наблюдаться только в том случае, если разность между значениями углов α и β не превышает половины переднего апертурного угла микрообъектива.

В большинстве случаев при исследованиях используются линейные равномерные растры, штрихи которых представляют собой прямые эквидистантно расположенные прозрачные полосы, разделенные непрозрачными промежутками. Возникающие при этом картины муаровых полос наиболее просты в расшифровке. Измерительные устройства, содержащие растры, часто называют растровыми измери-

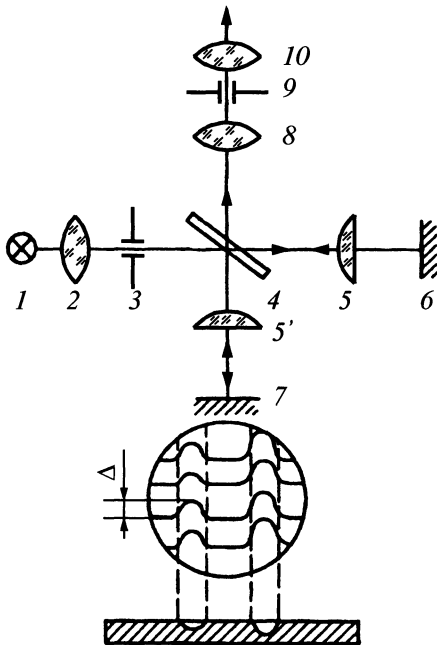


Рис. 7.24. Схема двухлучевого микроинтерферометра Линника:

- 1 – источник света; 2 – конденсор;
3 – диафрагма; 4 – зеркало; 5, 5' – объективы;
6 – эталонное зеркало; 7 – контролируемая поверхность; 8 – фокусирующая линза;
9 – диафрагма

тельными сопряжениями. Эти сопряжения позволяют производить косвенные измерения изменений физических величин посредством измерения изменений, происходящих в муаровой картине по смещению или развороту муаровых полос.

Интерферометры. Для контроля поверхностей применяют в основном интерференционные приборы.

Принцип действия интерферометров основан на сравнении световых волн, получаемых при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхностей.

На рис. 7.24 показана схема двухлучевого микроинтерферометра Линника. В ее основу положен принцип действия интерферометра Майкельсона. Свет от источника 1 (лампа накаливания) проходит через конденсор 2 и диафрагму 3, зерка-

лом 4 делится на два когерентных пучка, которые фокусируются объективами 5 и 5' соответственно на эталонное зеркало 6 и контролируемую поверхность 7. После отражения от эталона и изделия пучок проходит через те же элементы схемы и фокусируется линзой 8 в плоскости диафрагмы 9, в которой с помощью окуляра 10 наблюдают интерференционную картину взаимодействия эталонного и рабочего пучков света.

При этом наблюдают полосы интерференции, искривленные в соответствии с профилем исследуемой поверхности. Кривизну полос измеряют, например, с помощью окулярного микрометра. Она является количественной характеристикой микронеоднородностей поверхности изделия. Измерения можно проводить в белом или монохроматическом свете.

Микроинтерферометр может быть выполнен и с одним объективом. При этом светоделительное зеркало и эталон размещаются между микрообъективом и контролируемой поверхностью. При работе в белом свете высота неровности

$$H = 0,27 \Delta N,$$

где ΔN – изгиб интерференционной полосы в долях интервала.

При работе в монохроматическом свете

$$H = \lambda \Delta N / 2,$$

где λ – длина волны света.

Величину ΔN оценивают на глаз или измеряют окулярным винтовым микрометром.

При контроле шероховатости крупногабаритных изделий предварительно снимают слепок (реплику) с его поверхности, который затем помещают в кювету с иммерсионной жидкостью, располагаемой в фокальной плоскости микроинтерферометра, и исследуют обычным методом. Этот способ контроля получил название иммерсионно-репликового.

Наибольшая глубина рисок, измеряемых с помощью двухлучевых микроин-

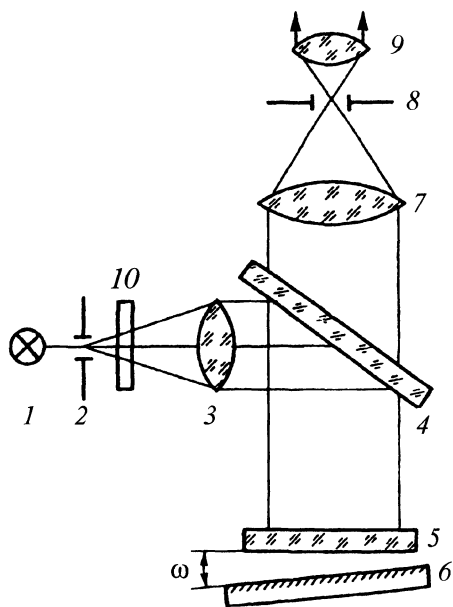


Рис. 7.25. Схема многолучевого интерферометра:

- 1 – источник света; 2 – диафрагма;
- 3 – конденсор; 4 – зеркало; 5 – пластина;
- 6 – объектив; 7–9 – элементы микроскопа;
- 10 – фильтр

терферометров, определяется апертурой и увеличением микрообъектива. Микроинтерферометры рекомендованы для измерений неровностей 0,1 ... 1 мкм.

Микроинтерферометры обычно снабжают устройством для фотографирования интерференционной картины.

Для расширения верхнего предела измерения интерферометров предложены различные устройства. Так, с помощью клинового компенсатора микроинтерферометрами можно измерять неровности высотой 4 ... 30 мкм.

Глубину рисок или ступенек, поверхности которых у верхнего и нижнего краев имеют достаточную отражательную способность, измеряют интерференционно-индикаторным методом. Интерференционные полосы наводят на резкость последовательно на дно риски и ее край. Глубина рисок определяется значением фокусировочного перемещения микрообъектива.

Этим методом можно измерять риски глубиной 20 ... 100 мкм при ширине до 0,25 мкм.

Схема многолучевого микроинтерферометра показана на рис. 7.25. Свет от источника 1 (ртутная лампа низкого давления, дающая монохроматическое излучение, выделяемое фильтром 10) через диафрагму 2 проходит конденсор 3 и параллельным пучком падает на полупрозрачное зеркало 4. После отражения пучок проходит пластину 5, накладываемую на объект 6 под малым углом ω . Ее нижняя сторона покрыта слоем вещества с коэффициентом отражения, близким к коэффициенту отражения контролируемой поверхности.

Между пластиной 5 и объективом 6 возникает интерференция многократно отраженных лучей. Картину интерференции, локализованную на поверхности пластинки, рассматривают в микроскоп (элементы 7–9).

Рефлектометрический метод измерения параметров шероховатости поверхности основан на зависимости между параметрами излучения, отраженного от шероховатой поверхности, и параметрами шероховатой поверхности. В отличие от профильных методов рефлектометрический позволяет определить параметр шероховатости, усредненный по площади освещаемой поверхность пятна.

Метод является косвенным и бесконтактным. Он обладает высокой чувствительностью и перспективен, особенно для поверхностей, для которых традиционные методы неэффективны или неприемлемы (например, для тонкообработанных и сверхгладких поверхностей). Рефлектометрический метод обеспечивает измерение параметра шероховатости с помощью сравнительно простых средств и может быть применен для автоматизации контроля шероховатости в цеховых условиях.

Теория рассеяния электромагнитных волн от шероховатой поверхности, на которой базируется рефлектометрический метод измерения параметров шероховатости

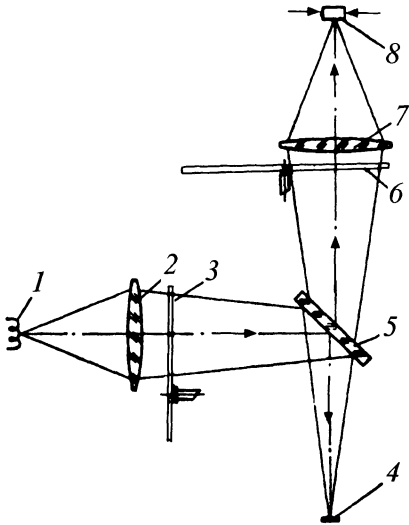


Рис. 7.26. Схема рефлектометра с нормальным падением излучения:

1 – источник измерения; 2, 7 – объективы;
3, 6 – модуляторы; 4 – образец; 5 – пластина;
8 – болометр

сти, в настоящее время разработана достаточно полно. Она решает задачу рассеяния в рамках целого ряда допущений и по существу описывает распределение отраженного от шероховатой поверхности излучения независимо от ее физической природы.

Для поверхностей, шероховатость которых является случайным процессом, теоретические зависимости связывают вероятностные характеристики рассеянного поля со статистическими характеристиками шероховатой поверхности при известном законе распределения. Используемые в процессе измерения параметров шероховатости расчетные формулы определяют зависимость между относительным коэффициентом отражения в различных направлениях при определенном угле падения и параметрами шероховатости.

Задача описания отраженного от поверхности поля решается двумя методами: методом Кирхгофа (или касательных плоскостей) и методом возмущений. Граничные условия для этих методов связывают значения элементов профиля по-

верхности с длиной волны излучения и углом падения его на поверхность. Для обоснования выбранной зависимости между параметрами шероховатости и отраженного поля и решения вопроса о применении расчетной формулы необходимо, учитывая длину волны излучения, диапазон углов падения и отражения, а также пределы среднеквадратичного отклонения высот неровностей, знать порядок таких величин, как средний шаг неровностей и интервал корреляции.

Используемые для определения параметров шероховатости расчетные формулы выведены без учета физических явлений, происходящих при отражении, в частности поглощения излучения, зависящего от оптических констант материалов – коэффициента преломления n и показателя поглощения χ .

Практически все известные на сегодняшний день рефлектометрические способы являются относительными, т.е. измеряют параметры излучения, отраженного от шероховатой поверхности, относительно параметров излучения, отраженного от образца сравнения. Если рефлектометр предварительно градуируется по образцам шероховатости, аттестованным другими методами, то образцами сравнения являются эти образцы. Когда же используется аналитическая формула, то измерение параметров отраженного излучения производится относительно образца сравнения, который, как правило, считается идеально гладким по сравнению с исследуемым образцом. В обоих случаях исходят из предположения о равенстве абсолютных коэффициентов отражения образца сравнения и исследуемого образца. В действительности это условие почти никогда не соблюдается, так как оптические свойства поверхности существенно зависят от ее состава и способов получения.

Рефлектометрический метод измерения параметров шероховатости поверхности. Конструкции рефлектометров, предназначенных для измерения парамет-

ров шероховатости, реализуют различные способы измерения, основанные на зависимости между параметром шероховатости и относительным коэффициентом отражения.

Рассмотрим способы измерения шероховатости σ (или $Ra = \sigma/1,25$) поверхностей с распределением высот неровностей, близким к нормальному.

На рис. 7.26 представлена принципиальная схема рефлектометра с нормальным падением излучения. Свет от источника излучения 1 с помощью объектива 2, отражаясь от полупрозрачной пластины 5, фиксируется на поверхность образца сравнения или исследуемого образца 4. Отраженный от поверхности пучок фокусируется объективом 7 в плоскости болометра 8. Освещающий и отраженный пучки модулируются модуляторами 3 и 6. Параметр шероховатости определяется по относительному коэффициенту зеркального отражения.

Пределы измерения $\sigma - 0,05 \dots 0,4$ мкм. Рабочие длины волн 1,5; 4,8 или 10 мкм выделяются светофильтрами в зависимости от требуемого диапазона измерения.

При этом значение ρ_z изменяется в пределах 85,2 ... 98,9 %. Рефлектометр нормального падения обеспечивает высокую чувствительность к изменению параметра σ/λ .

Способ измерения ρ_z при наклонном падении излучения целесообразно применять для грубо обработанных поверхностей, а также поверхностей из шлифованного кварца и стекла. При больших углах падения целесообразно производить градуировку приборов по образцам, аттестованным профильными методами.

Приборы для контроля методом фокусировки. Благодаря малой глубине резкости микрообъективов обычные микроскопы можно использовать в качестве эффективного и достаточно простого средства измерения глубины поверхностных дефектов. Измерение осуществляется последовательной фокусировкой микроскопа на дно риски или царапины и ее

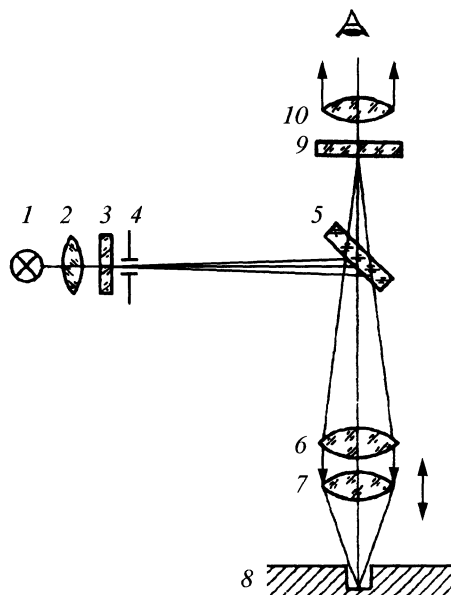


Рис. 7.27. Автоколлимационная схема измерения микрогеометрии:

- 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – фильтр;
- 4 – сетка; 5 – зеркало; 6 – линза;
- 7 – микрообъектив; 8 – объект; 9 – сетка со шкалой; 10 – окуляр

верхний край и регистрацией перемещения тубуса микроскопа. Погрешность измерения (в мкм) можно определить по формуле

$$\Delta z = \frac{0,2}{A^2},$$

где A – апертура микрообъектива. Для $A = 0,65$ $\Delta z = 1$ мкм.

Дальнейшее увеличение точности измерений связано с применением автоколлимационной схемы, показанной на рис. 7.27. Источник света 1 с помощью конденсора 2 и фильтра 3 освещает сетку 4 (обычно тонкое прозрачное перекрестие на темном фоне), которая проецируется полупрозрачным зеркалом 5, линзой 6 и микрообъективом 7 на объект 8. Изображение поверхности детали, на которую спроектировано перекрестие, наблюдается системой, состоящей из сетки со шкалой 9 и окуляра 10. Шкала служит для измерения размеров дефекта в горизонтальной плоскости.

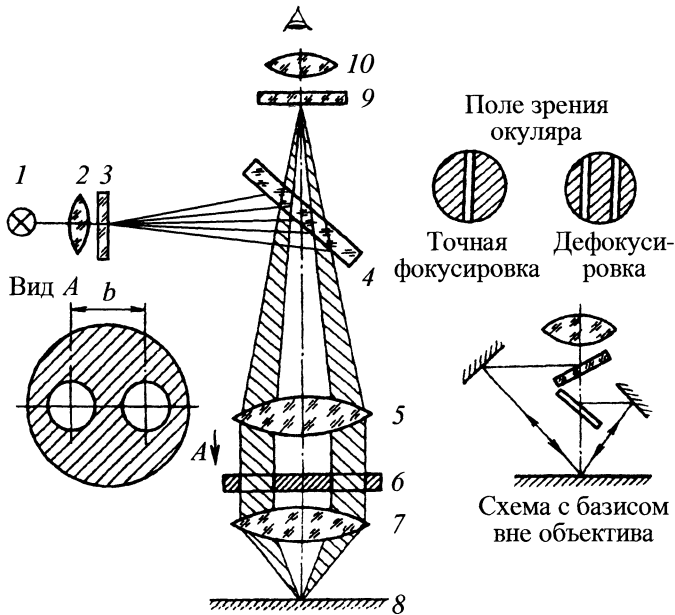


Рис. 7.28. Схема нониального метода измерения микронеровностей:

1 – источник света; 2 – конденсатор; 3 – сетка; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – тубусная линза; 6 – маска; 7 – объектив; 8 – объект; 9 – окулярная сетка; 10 – окуляр

Метод автоколлимации позволяет почти вдвое увеличить точность измерения, причем точность возрастает с уменьшением шероховатости поверхности. Критерием фокусировки является резкость изображения светящегося перекрестия, наблюдаемого одновременно с поверхностью объекта. Ввиду того, что ход лучей за тубусной линзой параллельный, при фокусировке можно перемещать только микрообъектив. Это перемещение измеряют, например, индикатором часового типа (ИГМ) с погрешностью $\pm 0,001$ мм.

Большую точность продольной фокусировки можно получить нониальным или биссекторным методом (рис. 7.28).

Источник света 1 через конденсор 2 освещает сетку 3 (например, прозрачный штрих на темном фоне), которая зеркалом 4, линзой 5 и объективом 7 фокусируется на объект 8. Автоколлимационное отражение маски в плоскости сетки 9 наблюдается в окуляр 10, в случае неточной фо-

кусировки раздваивается. Это позволяет в качестве критерия фокусировки использовать нониальное или биссекторное совмещение штрихов. Точность метода повышается при увеличении базиса b , например, в схемах с базисом вне объектива, как показано на рисунке.

Перспективным методом контроля микрогеометрии объектов является **стереоскопический метод**. Сущность его заключается в совмещении по глубине изображений объекта и специальной измерительной марки, располагаемой в фокальной плоскости окуляров стереомикроскопа. Перемещение марки, необходимое для этого совмещения, измеряют микровинтом. Оно характеризует глубину различных точек поверхности объекта. Точность измерения может достигать 0,002 мм при увеличении 100. Микроскоп имеет большое рабочее расстояние (до 90 мм), что удобно при эксплуатации прибора.

Теневым методом можно обнаружить дефекты поверхности размером менее $1/100$ длины волны света. Схема теневого метода контроля сферической поверхности показана на рис. 7.29. Точечный источник света помещают вблизи центра кривизны C зеркала. Рядом с ним располагают непрозрачный экран. При наблюдении поверхности зеркала 2 в зависимости от положения экрана можно увидеть картины $I-IV$. Если нож 1 точно расположить в плоскости источника, то его перемещение в направлении, перпендикулярном к оси зеркала, вызовет плавное уменьшение яркости изображения. При этом дефекты поверхности проявляются в виде пятна, половина которого темная, а половина светлая. Таким образом, можно определить место и примерный размер дефекта. Недостатком метода является трудность количественного определения размеров неровностей.

Этот метод применяют в основном в оптическом производстве. Разработан прибор для контроля теневым методом вогнутых и выпуклых параболических зеркал диаметром до 70 мм и радиусом $5 \dots 50$ мм.

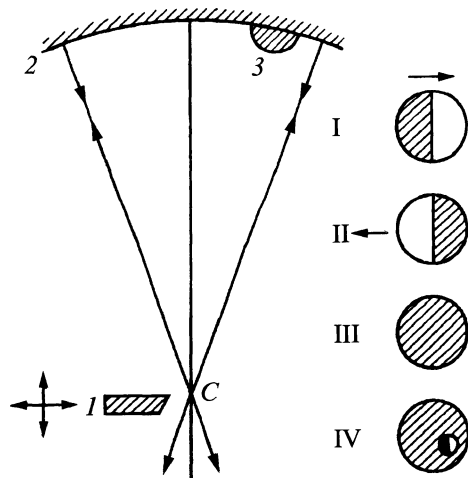


Рис. 7.29. Схема теневого метода контроля сферической поверхности:

- 1 – непрозрачный экран (нож);
- 2 – контролируемый объект (сферическое зеркало); 3 – дефект; C – центр кривизны зеркала;
- $I-III$ – изображения бездефектной поверхности при различных смещениях ножа от центра кривизны зеркала;
- IV – изображение дефекта

С помощью специальной насадки можно контролировать плоские детали.

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**8.1. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ**

**8.1.1. Эндоскопический контроль
газотурбинных двигателей и
ракетных систем**

Для повышения безопасности полетов техническое состояние двигателей необходимо регулярно контролировать. Для этого применяют рентгенографию; осмотр узлов с помощью эндоскопов; спектрографический анализ масла (раннее обнаружение разрушения подшипников, редукторов и других деталей, работающих в контакте с маслом); контроль вибрации двигателя (обнаружение поломок подшипников, лопаток компрессора, турбины и других деталей); устройство для автоматической записи параметров двигателей в полете с использованием ЭВМ и другие.

Анализ, проведенный в процессе переборки двигателей, снятых с самолетов из-за обнаруженных упомянутыми выше методами неисправностей, показал, что в 75 % двигателей было предупреждено развитие появившихся в них дефектов и только 25 % двигателей еще допускали дальнейшую эксплуатацию.

Устройства для осмотра полостей двигателей применялись и ранее, но в виде жестких оптических труб, так, например, эндоскопы фирм "Юньен" (Япония) и "Оптик" (Англия) и др. Однако возможности жестких эндоскопов ограничены, поэтому широкое распространение получили эндоскопы с волоконной оптикой и дистанционным управлением изгибом дистального конца.

Эффективность осмотров авиационных двигателей с помощью эндоскопов подтверждает опыт фирмы "Люфтганза" (ФРГ). Роль эндоскопического контроля возросла благодаря совершенствованию конструкций эндоскопов и созданию конструкций двигателей, приспособленных для такого контроля. Таков двигатель JT9D фирмы "Пратт Уитни" для самолета Боинг-747. На рис. 8.1 показана относительная доля дефектов, обнаруженных в двигателях JT9D и JT8D, последний из которых применяется на самолетах Боинг-727 и 737.

Если на двигателе JT8D, конструкция которого менее приспособлена для ввода эндоскопов, доля визуального внешнего осмотра составляла 54 % и только 4 % дефектов были обнаружены с помощью эндоскопов, то в двигателе JT9D доля этих методов контроля технического состояния составила соответственно 20,6 % и 47 %.

На рис. 8.2 приведены процентные соотношения контролируемых с помощью неразрушающих методов углов газотурбинных двигателей.

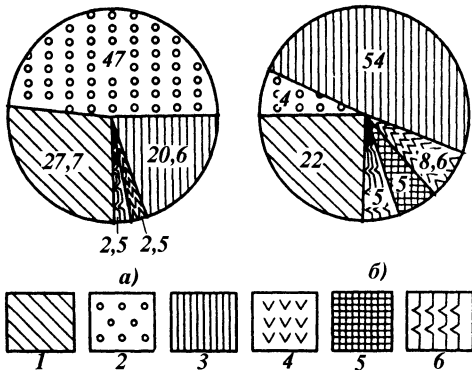


Рис. 8.1. Относительная доля (%) дефектов, обнаруженных в двигателях:
 а – JT9D; б – JT8D; 1 – контроль по приборам, контролирующим работу двигателя;
 2 – контроль с помощью эндоскопов;
 3 – визуальный контроль; 4 – контроль с помощью магнитной ловушки и фильтра;
 5 – контроль спектроскопическим анализом масла; б – контроль по расходу масла

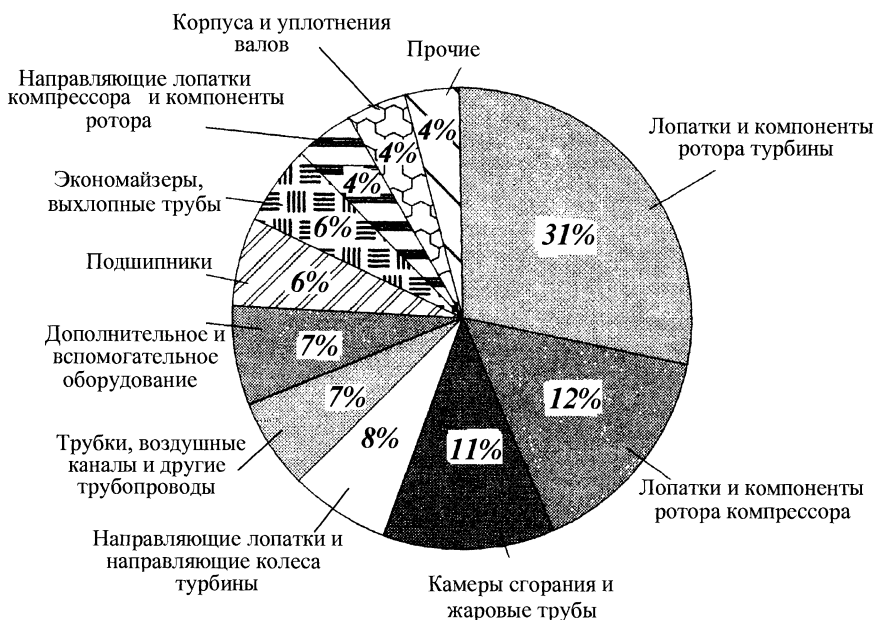


Рис. 8.2. Объекты контроля ГТД

Специализированные авиаэндоскопы. Самолетные двигатели требуют постоянного и частого обследования и ввиду этого являются самыми трудоемкими с точки зрения контроля. Однако многие из узлов можно контролировать с помощью смотрового прибора без демонтажа.

Хорошим примером является камера сгорания в газовой турбине, подвергающаяся пламенной эрозии. В результате возможных дефектов в сварном шве камера требует частой замены. Если зарождающиеся трещины в ней не будут своевременно обнаружены, то самолет выйдет из строя. Своевременный визуальный контроль позволил бы значительно удлинить ресурс камеры сгорания и повысить безопасность полетов.

Прибор, спроектированный для ввода в камеру сгорания через отверстие в штуцере горелки, позволяет получить цветное изображение внутренней поверхности, в частности определить качество сварного соединения без демонтажа двигателя.

Контроль компрессорных и турбинных лопаток в смонтированном двигателе

представляет определенные трудности. Газовая турбина работает на больших высотах, где иногда циркулирует радиоактивная пыль, оставшаяся от ядерных взрывов. Небольшая часть ее оседает на лопатках и стенках турбины, создавая некоторую остаточную радиоактивность. Ввиду этого контроль турбины рекомендуется делать быстро, используя эндоскоп.

Имеются перспективы применения неразрушающих средств контроля для автоматизированной логической обработки результатов наблюдения, что обеспечит более высокую его объективность. Эндоскопы могут также использоваться в самолетостроении для облегчения манипуляций на расстоянии: при пайке и сварке, шлифовке и полировке и при других операциях, которые проводятся при прямом наблюдении на любой глубине внутри полости.

С соответствующим охлаждением эндоскопы могут применяться для проверки участков камер сгорания работающих газовых турбин. Приборы с водяным охлаждением и с форсированным обдувом

углекислым газом используются в промышленности при температурах до 1200 °С.

При дальнейшем развитии авиационной техники потребуются узкоспециализированные эндоскопы. Для этого необходимо тесное сотрудничество конструкторов летательных аппаратов и оптических приборов, чтобы уже на стадиях проектирования предусматривать в двигателе, фюзеляже и крыльях нормализованные отверстия, через которые можно было бы ввести приборы и обеспечить всесторонний визуальный контроль.

Телеэндоскоп для контроля лонжеронов вертолетов. Разработан телеэндоскоп для просмотра труб лонжеронов, отличающийся от существующих эндоскопов отсутствием промежуточной оптической системы (т.е. телескопических труб и окуляра), наличием автоматической системы сканирования по окружности отверстия, применением автоматического механизма фокусирования объектива.

Прибор включает в себя телекамеру, видеомонитор и соединительный кабель длиной 25 м. Камера состоит из неподвижной части и приспособления для сканирования. В неподвижной части размещены объективная часть, включающая объектив, механизм автоматической фокусировки и систему подсветки.

Приспособление для сканирования имеет электропривод, обеспечивающий возвратно-поступательное автоматическое движение сектора наблюдения по окружности с частотой вращения 6 мин⁻¹. Поступательное перемещение камеры с помощью штока или троса создает сканирование по глубине отверстия.

Механизм автоматической фокусировки работает следующим образом. Следящий рычаг под действием пружины упирается в стенку осматриваемой трубы. При перемещении камеры рычаг с роликом скользит по стенке рядом с осматриваемым участком и при изменении расстояния объект–объектив поворачивает кулачок, который через толкатель пере-

мещает обойму с объективом. Под действием пружины толкатель всегда упирается в кулачок, форма которого подобрана такой, что при изменении расстояния от оси камеры до стенки трубы в пределах 28 ... 110° обеспечивается качественная фокусировка.

Телеэндоскоп для контроля лопастей вертолетов. Раньше на одном из американских вертолетных заводов фирмы "Boeing", для визуального контроля дефектов в лопастях с внутренним диаметром до 9,5 мм применяли простой эндоскоп бокового наблюдения с 1,5-кратным увеличением при ручном методе сканирования. Отсутствие средств центрирования и необходимость подфокусировки, а также быстрое утомление контролера (осмотр одной лопасти продолжался не менее 4 ч) снижали надежность дефектоскопии.

В настоящее время применяется телеэндоскоп, который позволяет осматривать лопасть за один час. Автоматическая система сканирования и большое увеличение оптической системы снижают вероятность пропуска дефектов. Подобные приборы могут применяться для контроля лонжеронов, тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в ядерных реакторах и других изделий.

Для контроля элементов проточек, канавок корпусов применяют радиусомер ОТ-50Р.

Конструктивно прибор выполнен в виде трубки, в которой расположены оптические элементы схемы прибора – собственно радиусомер и осветитель, соединенные между собой световодом.

Оптическая схема прибора включает источник света (лампа накаливания) и световод, выходной торец которого освещает ножевую диафрагму, контактирующую с поверхностью изделия. Образующий при этом светящийся зазор между кромкой изделия и диафрагмой повторяет форму профиля изделия и с помощью зеркал и линз проецируется в плоскость сетки. Таким образом, радиусомер выполнен по схеме теневого сечения.

Радиус изображения кромки изделия сравнивают с радиусом окружностей, нанесенных на сетку; определяют радиус, наиболее близкий к контролируемому, и производят соответствующий отсчет.

В приборе могут быть использованы также сетки другого типа, например, с линейной шкалой.

Прибор прикладывают к поверхности имитатора образцового корпуса, в котором выполняются разрезы, позволяющие измерить радиус кривизны кромок на измерительном микроскопе по стандартной методике. Имитатор выполняется из того же материала, что и контролируемое изделие.

Погрешность измерения радиусов кромок имитатора должна быть не более 0,02 мм. Радиусы канавок имитатора должны быть в диапазоне 0,3 ... 0,7 мм.

При измерении необходимо следить, чтобы корпус прибора был параллелен образующей внутреннего канала имитатора корпуса и плотно прижимался к нему.

Компьютерная видеодефектоскопическая система для контроля сотовых панелей авиационных турбин. Сотовые уплотнения (СУ) – ответственный элемент современных газотурбинных двигателей (ГТД). СУ изготавливают, как правило, из гофрированных металлических лент в виде сотовых структур, которые затем крепятся на внутренней стороне статора ГТД методом пайки. Дефекты пайки (локальное отсутствие припоя, нарушение теплового режима и т.п.) приводят к отслоению и отрыву СУ, что, в свою очередь, катастрофически влияет на работу ГТД. В этой связи контроль СУ – актуальная задача.

Основные методы контроля СУ в настоящее время – акустический и визуальный. Перспективный фототермический метод не нашел широкого применения из-за сложности процедур контроля. В ряде случаев (недоступность СУ для УЗ-контроля из-за приливов, элементов на

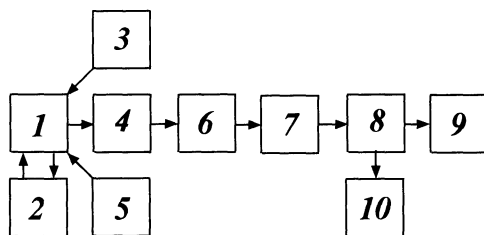


Рис. 8.3. Блок-схема системы контроля сотовых уплотнений DX 3 SCH:
 1 – объект; 2 – механизм перемещения объекта;
 3 – широкопольный осветитель;
 4 – ПЗС-телекамера; 5 – блок лазерной локальной подсветки; 6 – плата оцифровки изображения; 7 – ПЭВМ; 8 – дисплей;
 9 – оператор; 10 – принтер

роторе, малой величины сот и пр.) визуальный метод (ВМ) является основным. ВМ реализуется в двух вариантах – осмотр сот в отраженном свете и наблюдение эффекта "просачивания" света из освещаемой локально световодом соты в соседние ячейки, что имеет место при отсутствии припоя.

При осмотре в отраженном свете СУ с некачественной пайкой формируют характерное изображение с явной точкой в центре каждой ячейки. Отсутствие припоя, другие дефекты приводят к резким изменениям в структуре световых бликов от ячейки (падает общая яркость, исчезает пятно в центре и др.). Однако при существующих методиках (визуальный контроль) неизбежные изменения условий наблюдения (геометрия, яркость), приводят к утомлению оператора, пропуску дефектов, особенно в СУ с малыми ячейками.

В ЗАО МНПО "Спектр" создана компьютеризованная телевизионная дефектоскопическая система DX 3 SCH для контроля качества пайки СУ. Система, блок-схема которой показана на рис. 8.3, включает оптико-электронный блок, состоящий из ПЗ-телекамеры 4 и двух осветителей 3 и 5, предназначенных соответственно для широкопольной и локальной подсветки сот. С помощью платы оцифровки 6 видеосигнал поступает в компьютер 7. Опе-

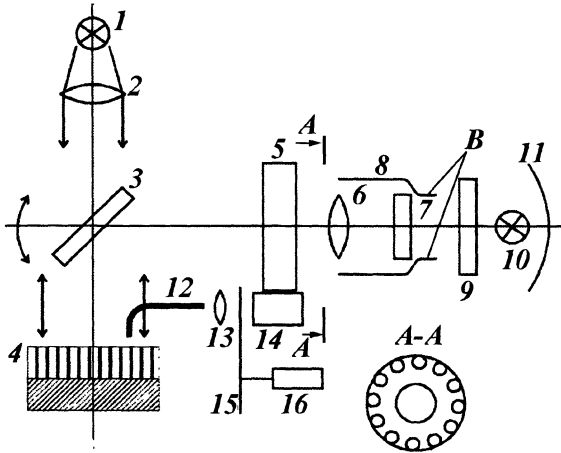


Рис. 8.4. Оптическая схема электронного модуля системы DX 3 SCH:

- 1 – светодиод; 2 – линза; 3 – светоделитель; 4 – объект; 5 – светофильтр; 6 – объектив;
 7 – телекамера; 8 – световоды; 9 – теплофильтр; 10 – лампа; 11 – отражательный эллипсоид;
 12 – световод для локальной подсветки; 13 – фокусирующий градан; 14 – лазер; 15 – obtюратор;
 16 – двигатель

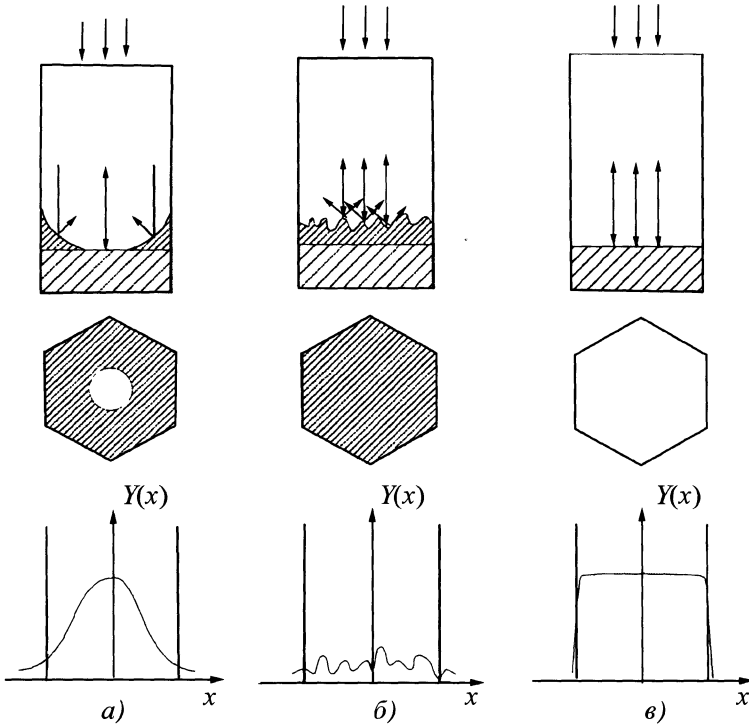


Рис. 8.5. Схема формирования световых бликов от различных участков сот для качественной пайки (а), нарушения теплового режима (плохое растекание припоя) (б), полного или частичного отсутствия припоя (в)

ратор 9 наблюдает на дисплее 8 изображение сот, фиксируя их в случае необходимости в памяти ПЭВМ и с помощью принтера 10. Система включает также блоки питания (на схеме не показаны) и устройство перемещения объекта.

Оптическая схема оптико-электронного блока приведена на рис. 8.4. Излучение светодиода 1 с узкой диаграммой направленности ($\alpha < 10^\circ$) дополнительно коллимируется линзой 2 до значения угла расходимости пучка порядка $1 \dots 2^\circ$ и через светоделитель (полупрозрачное зеркало) 3 направляется на контролируемый объект – соты 4 ортогонально к его поверхности. Отклонение оси пучка от нормали к поверхности СУ в пределах $\pm 1^\circ$ обеспечивается угловой юстировкой светоделителя 3.

Наблюдение сот производится по методу светлого поля, при котором световой блик от ячеек дает характерное отражение, схематически изображенное на рис. 8.5. При качественной пайке гладкая поверхность галтелей припоя действует подобно сферическим микрзеркалам и концентрирует свет по оси ячейки, которая в данном случае может моделироваться призматическим световодом шестигранной формы, симметризирующим пучки лучей, отраженных от дна СУ.

При плохом режиме пайки отсутствуют галтели и шероховатая поверхность припоя действует как квазидиффузный (ламбертовский) отражатель, давая относительно полную картину световых бликов достаточно хаотической структуры.

При полном отсутствии (пропуске) припоя дно соты в отраженном свете выглядит как яркий шестигранный блик, повторяющий форму соты. Соответствующие изображения сот и их яркостные профили также показаны на рис. 8.5.

При плохом прилегании СУ к основанию из-за некачественной пайки дополнительным критерием дефектности служит эффект просачивания (тунелирования) излучения от световода, введенного в ячейку, в соседние соты через микрозазо-

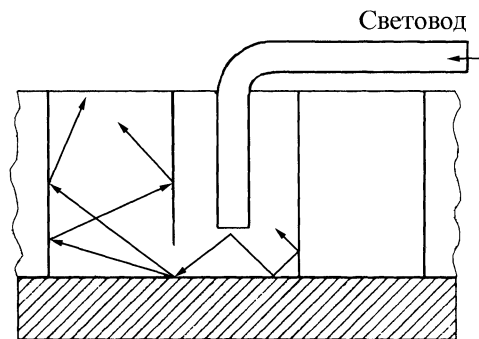


Рис. 8.6. Метод формирования контрольного изображения

ры между СУ и подложкой (рис. 8.6). Обычно эта достаточно трудоемкая операция производится только на сомнительных участках СУ, выявленных предварительно телевизионным методом.

В системе DX 3 SCH применен метод спектральной селекции для устранения влияния засветок от внешних источников. Для этого перед объективом 6 телекамеры 7 установлен светофильтр 5, полоса пропускания которого совпадает со спектральной характеристикой излучения светодиода 1 (см. рис. 8.4).

Наряду с освещением объекта коллимированным пучком света в системе предусмотрена его подсветка слабосходящимся излучением с помощью световодов 8, расположенных симметрично в кольцевой зоне вокруг объектива 6 для обеспечения равномерности освещенности объекта. Апертура пучка лучей на выходе световодов – порядка 10° . Это позволяет наблюдать СУ с ячейками малых размеров (≤ 1 мм), расположенные на цилиндрических поверхностях большой кривизны ($R \leq 100$ мм), так как освещению параллельным пучком в этом случае препятствует затенение (экранирование) сот, расположенных вне оптической оси освещения, а также нарушение ортогональности падения лучей на дно сот.

Входные торца световодов 8 освещаются от галогенной лампы 10 КГМ (50 Вт, 12 В) с помощью отражательного

эллипсоида 11 через теплофильтр 9. Излучение на выходе световодов фильтруется теплофильтром 9, что обеспечивает его селективность.

Локальная подсветка сот производится полимерным световодом 12 диаметром 0,6 мм, в который вводится излучение лазера 14 ($\lambda = 0,63$ мкм, $W = 2$ мВт) с помощью фокусирующего градана 13.

Контроль ввода световода в ячейку и наблюдение просачивания света производится с помощью телекамеры 7. Для повышения чувствительности контроля предусмотрена модуляция излучения лазера с частотой 5 ... 10 Гц с помощью обтюлятора 15 и двигателя ДПМ 16. Настройка видеосистемы производится по контрольным образцам.

Методика работы заключается в последовательном просмотре СУ, например, при вращении объекта с малой скоростью ($v \approx 1$ мм/с), фиксации координат, размеров и типа дефектов и сопоставлении этих данных с допустимыми значениями.

В настоящее время предусмотрена работа системы в интерактивном режиме. Оператор устанавливает оптимальные режимы освещения объекта, контролирует правильность его установки в механизме перемещения, регулирует качество изображения аналоговыми (диафрагмирование объектива и масштабирование изображения сменой его фокусного расстояния), а также цифровыми (программными) средствами (эквализация гистограмм; регулирование резкости, яркости, контраста; электронное масштабирование изображения и т.п.).

При необходимости изображение выводится на принтер и (или) сохраняется в базе данных (архиве изображения) ПЭВМ.

8.1.2. Оптический контроль формы лопаток ГТД

При применении метода светового сечения контролируемый объект устанавливается так, что его ось совпадает с оптической осью специального прибора. На

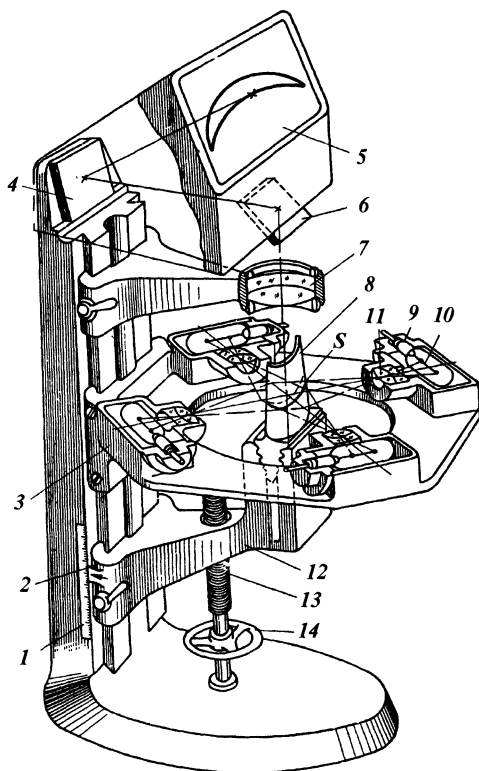


Рис. 8.7. Схема проектора светового сечения:

- 1 – шкала; 2 – нониус; 3 – вращающийся стол;
- 4, 6 – зеркала; 5 – экран; 7 – объектив;
- 8 – деталь; 9 – осветитель; 10 – лампы;
- 11 – линзы; 12 – тиски; 13 – винт; 14 – маховик

поверхность объекта направляется приблизительно под углом 90° тонкий пучок света большой интенсивности. При этом получается светящийся пояс, очерчивающий контур сечения, который проецируется на экран. Для устранения оптических помех от поверхности объекта, прилегающего к контролируемому сечению, обычно ее покрывают тонким слоем вещества с большим коэффициентом диффузного отражения или наносят на зачерненную поверхность лопатки тонкие белые линии в контролируемых сечениях.

На рис. 8.7 представлена схема такого проектора. Для получения светового сечения полного контура детали служат осветители 9, установленные на круглом

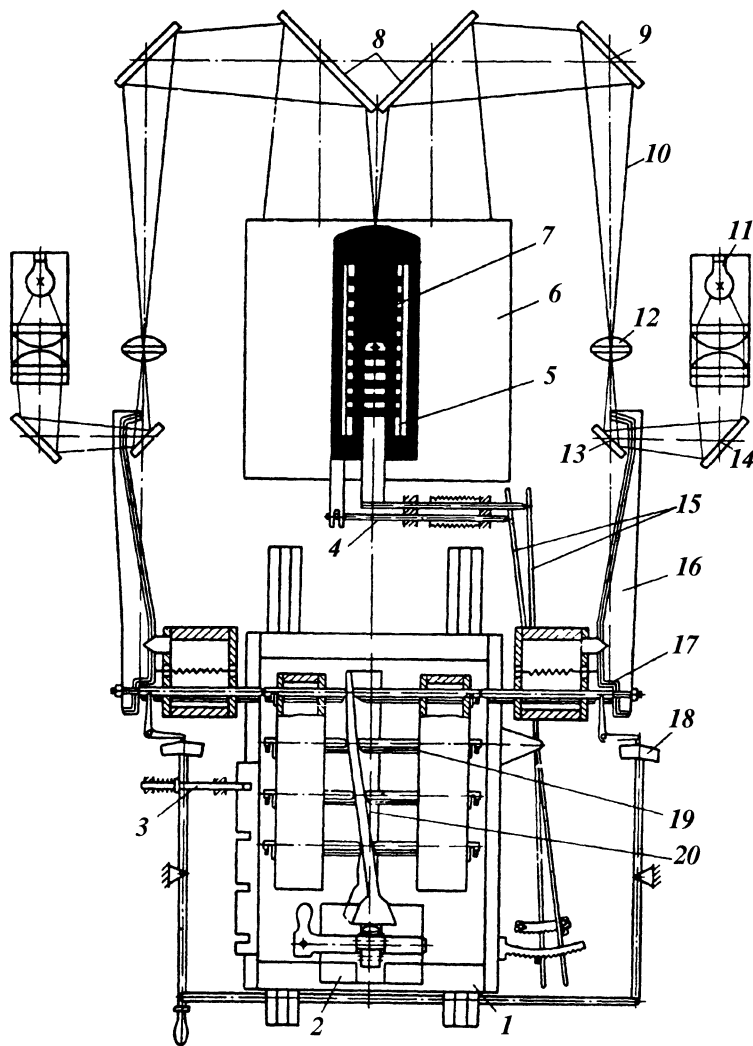


Рис. 8.8. Схема оптико-механического прибора ПОМКЛ-3 для контроля пера лопаток

вращающемся столе 3. Осветитель состоит из лампы накаливания 10 и проекционных линз 11. Оси проекционных линз всех осветителей расположены в одной плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива 7. Узкие пучки света, посылаемые осветителями, создают световое сечение S на детали 8, которое объективом 7 и зеркалами 6 и 4 воспроизводится в увели-

ченном масштабе (увеличение $10 - 20\times$) на экране 5. Детали устанавливаются в специальных тисках 12, которые могут быть смещены в вертикальном направлении поворотом маховика 14 винта подачи 13. Отсчет вертикальных перемещений детали производится по шкале 1 и нониусу 2. Точность отсчета – $0,04$ мм при увеличении $10\times$ и $0,015$ мм – при $20\times$.

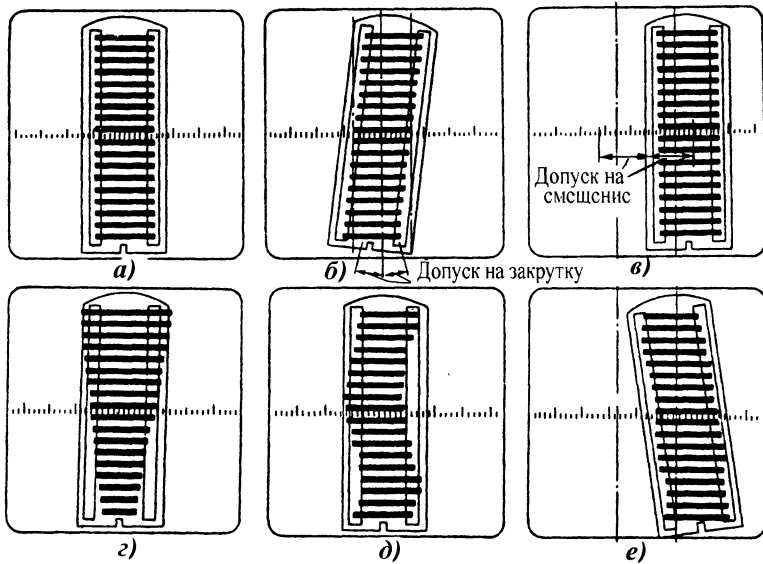


Рис. 8.9. Схема расположения допусков и погрешностей лопаток на экране:
a – эталон; *б* – закрутка пера; *в* – смещение пера; *г* – толщина за пределами допусков;
д – профиль за пределами допусков; *е* – профиль спинки и корыта, толщина, закрутка и смещение пера в пределах допусков

Все проекционные методы являются бесконтактными, не требуют применения дорогостоящих металлических копиров и шаблонов, дают возможность контролировать малые радиусы, фаски и галтели, контроль которых другими методами невозможен, и обеспечивают возможность комплексного контроля, т.е. одновременного контроля нескольких поверхностей и их взаимного расположения.

Недостатками проекционного контроля являются ограниченность увеличения из-за снижения резкости изображения (максимальное увеличение $100\times$), малое поле зрения при большом увеличении, необходимом для контроля точных деталей.

Контроль криволинейных поверхностей часто осуществляется методом контроля в выбранных точках. В этом методе серию контактных штифтов устанавливают по контуру проверяемого сечения. При этом все свободные концы штифтов лежат в одной плоскости. В процессе контроля

отклонения профиля вызывают перемещение контактных штифтов, которые либо преобразовываются в изображения, проецируемые на экран (в оптико-механических приборах), либо в изменения давления в пневматической системе (в пневматических приборах). Так работают приборы ПОМКЛ-3 и 4 фирм "Ватсон", "Сигма", "Шеффилд" и др.

Рассмотрим некоторые приборы для контроля пера лопатки.

При серийном и массовом изготовлении лопаток наибольшее применение на отечественных заводах получили приборы ПОМКЛ, в которых контроль криволинейной поверхности профиля лопаток осуществляется оптико-механическим способом.

По профилю проверяемого сечения пера лопатки 20 (рис. 8.8) устанавливаются с определенным шагом контактные стержни 19. Свободные концы стержней по эталону приведены к единой плоскости измерения. Отклонения профиля пера от

заданного вызывают перемещения контактных стержней 19, передающиеся на измерительные стержни 17, и далее на рычажки 16 с отношением плеч 5:1.

От осветителей 11 через отражатели 14, 13 и объектив 12 луч 10 через отражатели 8, 9 проектирует на экран 6 концы рычажков 16 с увеличением 10:1, обеспечивая таким образом общее увеличение 50:1. На экране 6 устанавливаются границы поля допуска с помощью фиксатора 3, по которым можно установить пригодность контролируемой лопатки. Арретирование измерительных стержней 17 осуществляется кулачками 18.

В зависимости от погрешностей профиля в контролируемом сечении концы рычажков на экране либо отклоняются по отдельности от базовых прямых 7 (при местных погрешностях профиля), либо смещаются параллельно базовым прямым (при смещении всего сечения), либо располагаются на одной прямой под углом к базовой линии (при погрешности в угле закрутки). Масштаб изображения контролируется по расстоянию между штриховыми метками 5. Схема расположения допусков и погрешностей лопатки изображена на рис. 8.9.

Положение контактных блоков прибора определяется фиксатором 3 (см. рис. 8.9), а расположение границ поля допуска относительно контактных блоков через стержни 4 – установочными линейками 15.

Проверяемая лопатка в приборе закрепляется по замку зажимом 2. Контроль происходит по точкам с шагом 5 мм. Каретка 1 прибора служит для установки и перемещения контактных блоков от одного проверяемого сечения к другому.

Достоинствами прибора ПОМКЛ являются: возможность выявления погрешностей профиля пера лопатки независимо от смещения всего сечения относительно оси замка и погрешности угла закрутки; использование одного и того же прибора для контроля различных лопаток (меняются лишь контактные блоки); практическая

неизнашиваемость копиров или эталонных лопаток; отсутствие следов измерителей на поверхности лопатки, что позволяет использовать даже восковые модели.

На приборе ПОМКЛ можно проверять лопатки длиной до 250 мм и шириной до 100 мм. Погрешность измерения – не более 0,02 мм. Продолжительность переналадки – до 3 мин. Пропускная способность – 120 ... 250 шт/ч.

8.1.3. Применение оптико-механических приборов при производстве летательных аппаратов

Методы оптических измерений, используемые в сборочных и монтажных работах. Основными методами являются методы визирования, коллимационный, автоколлимационный и совокупный методы. Каждый из этих методов отличается применением различных по конструкции оптических приборов или использованием их в определенных сочетаниях, создающих нужную схему для измерений.

Рассмотрим наиболее важные из этих методов.

Метод визирования. Сущность метода заключается в том, что визирная линия зрительной трубы устанавливается в горизонтальной плоскости, т.е. перпендикулярно к направлению действия силы тяжести. Визирную трубу располагают на одном конце контролируемой поверхности, и в заданных точках посредством отсчетных устройств трубы или марки измеряют смещение центра целевого знака относительно визирной оси трубы. Методом визирования нивелируют агрегаты, выставляют изделия в полетное положение, контролируют прямолинейность, плоскостность, измеряют соосность отверстий и пр.

Коллимационный метод. Коллимационным называется такой оптический контроль, который позволяет точно установить зрительную трубу относительно выбранной точки или объекта. Коллимационный метод реализуется с помощью оп-

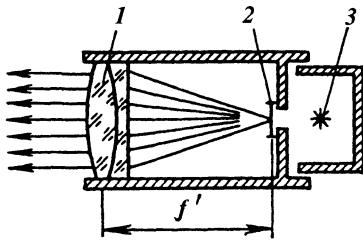


Рис. 8.10. Схема коллиматора:

1 – объектив; 2 – сетка; 3 – источник света

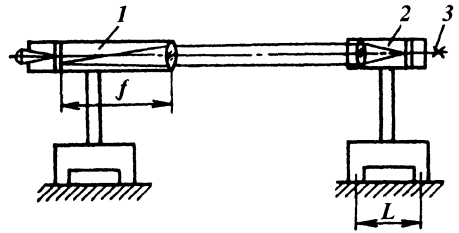


Рис. 8.11. Схема установки

зрительной трубы и коллиматора:

1 – зрительная труба; 2 – коллиматор;

3 – источник света

тической системы, в которую входят зрительная труба и коллиматор. Этим методом можно контролировать не только прямолинейность плоскостей, но и соосности валов и отверстий.

Коллиматор представляет собой устройство для создания параллельного пучка лучей. Он состоит из объектива 1 (рис. 8.10), сетки 2, помещенной в задней фокальной плоскости, и источника света 3, который освещает сетку. Так как сетка находится в фокальной плоскости, то все лучи, идущие от центра перекрестия сетки, будут параллельны визирной линии, когда они выйдут из объектива. Их направление будет таким, как если бы они вышли из точки, находящейся в бесконечности позади коллиматора, расположенной на визирной линии.

Если такой коллиматор установить в подшипник или патрон, прикрепленный к устройству, которое должно быть расположено строго по прямой линии, то ось отверстия подшипника или устройства, в которое установлен коллиматор, можно выставить параллельно визирной линии любой зрительной трубы.

Метод состоит в следующем. Вместо отражательного зеркала, которое применяется при автоколлимационном методе, используют коллиматорную трубу, смонтированную на подставке или установленную соответствующим образом в зависимости от условий измерений. В фокальной плоскости объектива зрительной трубы

также помещается сетка, выполненная в форме двойного перекрестия или вертикальной и горизонтальной шкал.

При проведении измерения коллиматор устанавливают на контролируемую поверхность, а зрительную трубу располагают напротив коллиматора (рис. 8.11). Коллиматор ориентируют в исходное положение (отмечают значение начального отсчета), а затем перемещают вдоль контролируемой поверхности. Смещение изображения перекрестия коллиматора определяется по шкале зрительной трубы.

Зрительную трубу сначала наводят на коллиматор и фокусируют на бесконечность, а затем на перекрестие коллиматора. Если коллиматор установлен параллельно визирной линии трубы, то центр его перекрестия совпадает с центром перекрестия зрительной трубы независимо от того, будет ли коллиматор сдвинут вверх, вниз, вправо или влево.

Коллиматоры, применяемые для оптических измерений в машиностроении, обычно снабжены двумя марками для измерения смещений. Марка для измерения наклонов используется вместо сетки. Она градуирована в минутах и по ней можно определять наклоны коллиматора в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Марка для измерений смещений нанесена на плоской задней поверхности объектива или установлена впереди объектива коллиматора.

Если зрительная труба, с помощью которой ведется наблюдение, сфокуси-

вана на марку для измерения наклонов, то таким образом она будет сфокусирована в бесконечность и марка для измерения смещений не будет видна. Если зрительную трубу, через которую ведется наблюдение, сфокусировать на марку для измерения смещений, то не будет видна марка для измерения наклонов. При такой схеме можно установить коллиматор соосно с визирной линией зрительной трубы.

Такую схему оптической системы можно использовать для регулирования соосности валов двигателя и редуктора вертолетов, а также для установки и контроля промежуточных редукторов на вертолетах.

Автоколлимационный метод. Автоколлимационным называется такой оптический метод контроля, который позволяет проецировать изображение точки или объекта в плоскость самого объекта. Этот метод контроля осуществляется с помощью оптической системы, в которую входят автоколлиматор и плоское зеркало, передвигаемое по контролируемой поверхности или специально обработанные зеркальные пластины.

Если зеркало перпендикулярно оптической оси объектива, то изображение совпадает с самим перекрестием. При наклоне зеркала на угол α изображение смещается на $a = Ftg2\alpha$.

Для определения значений a , а следовательно, и угла наклона зеркала автоколлиматор обычно снабжается окулярным микрометром.

Автоколлимационный метод контроля очень чувствителен даже к незначительным поворотам зеркала. При повороте зеркала на какой-либо угол лучи отклоняются на удвоенную величину поворота. Чувствительность автоколлимационного метода тем больше, чем больше фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

В процессе сборочных работ на самолетах и вертолетах автоколлимационный метод применяют при взаимозависимой установке агрегатов, узлов и плит ступельной оснастки. Для этого в каждом

конкретном случае необходимо предусматривать специальные приспособления, которые давали бы возможность правильно устанавливать оптические приборы.

Совокупный метод. Сущность совокупного метода оптического контроля заключается в том, что данный метод позволяет применять в последовательном порядке и визирование и автоколлимацию. Осуществляется это с помощью такой оптической схемы, в которую входит зрительная труба, имеющая автоколлимационное устройство и зеркальный целевой знак.

Автономный контроль и монтаж узлов технологической оснастки. Монтаж отдельных узлов ступельной оснастки с помощью оптических приборов иногда экономически целесообразно осуществлять, не прибегая к построению координат оптических систем. Это выгодно делать тогда, когда ступельная оснастка проста по своей конструкции, малогабаритна и не требует проведения повторных контрольных работ.

Для установки и контроля плит ступеля килевой балки вертолета на параллельность можно воспользоваться промежуточным и хвостовым редукторами, на которые устанавливают оптические приборы (рис. 8.12). Для начала работы одну

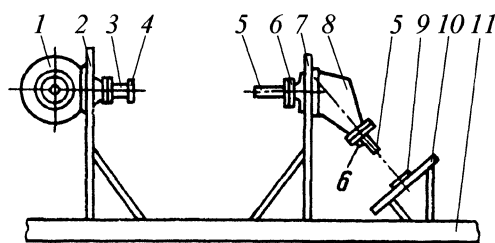


Рис. 8.12. Схема контроля параллельности установки плит ступеля килевой балки вертолета:

- 1 – хвостовой редуктор; 2 – плита;
- 3 – приспособление для установки зеркала;
- 4 – зеркало; 5 – прибор ППС-11;
- 6 – приспособление для установки прибора ППС-11; 7 – плита; 8 – промежуточный редуктор; 9 – зеркало; 10 – плита; 11 – ступель

из плит, например плиту 7, принимают за базу и выставляют по отвесам. Затем на базовую плиту устанавливают промежуточный редуктор, а на плиту 2 – хвостовой редуктор. На тот и другой редукторы устанавливаются приспособления для базирования оптических приборов. На промежуточный редуктор 8 установлен прибор ППС-11, на хвостовой редуктор 1 – зеркало. Фокусируя визирную трубу на зеркало и наблюдая в окуляр прибора, можно заметить несовпадение центров перекрестий сетки визирования и марки авторефлектора прибора.

Система автоматизированного воспроизведения формы и управления размерами. Процесс формирования геометрических параметров самолета можно разделить на ряд взаимосвязанных этапов: проектирование планера, технологическая подготовка производства (изготовление оснастки) и воспроизведение формы самолета в производстве. Связующим звеном при формировании геометрических параметров на всех трех этапах является плазово-шаблонный метод. Этот метод позволяет создать эталоны формы и размеров – плазы, шаблоны, макеты поверхностей и пр., по которым воспроизводится и контролируется точность деталей, узлов и агрегатов изделий.

Однако дальнейшее развитие самолетостроения накладывает существенный отпечаток на характер этих связей и изменяет содержание методов воспроизведения формы конструкций и контроля геометрических параметров. Рассмотрим принципиальные вопросы этих изменений.

Взросшая сложность конструкций самолетов и большой объем проектных работ, связанных с созданием новых летательных аппаратов, заставили искать пути автоматизации процессов проектирования.

Очевидно, что наиболее перспективным направлением совершенствования проектных работ является машинное проектирование самолета. Интенсивные исследования в этой области проводятся как

в отечественном, так и в зарубежном самолетостроении.

Основу одной из перспективных схем системы автоматизированного воспроизведения формы и управления размерами при машинном проектировании самолетов составляет математическая модель самолета, построенная на основании информации, полученной из чертежей изделия (рис. 8.13).

Новый характер и содержание процессов, связанных с воспроизведением геометрических параметров деталей узлов и агрегатов самолетов, определяют направления дальнейшего развития методов контроля. Среди бесконтактных измерительных систем на первый план выступают лазерные и оптические измерительные системы, приборы и устройства. В настоящее время определилась потребность самолетостроения в таких типах лазерных измерительных систем, как центрирующие измерительные системы (ЛЦИС), контурные измерительные системы (ЛКИС), дальномерные измерительные системы (ЛДИС), измерители перемещений (ЛИП).

Комплекс названных измерительных систем составляет основу современных методов бесконтактного контроля технологической оснастки и изделий.

ЛЦИС предназначена для монтажа и безмакетной увязки технологической оснастки, высокоточной сборки, стыковки и нивелировки самолетных конструкций. С помощью этих приборов осуществляют: выставление и координацию расположения в пространстве конструктивных элементов ступеней; разметку на каркасе планера самолета базовых осей; проверку плоскостности, параллельности, перпендикулярности и соосности отдельных элементов конструкций. Среди лазерных измерительных систем ЛЦИС является наиболее универсальным измерительным средством. С помощью этой системы выполняют основные виды контрольных работ, поэтому в книге главное внимание уделено рассмотрению именно данного вопроса.

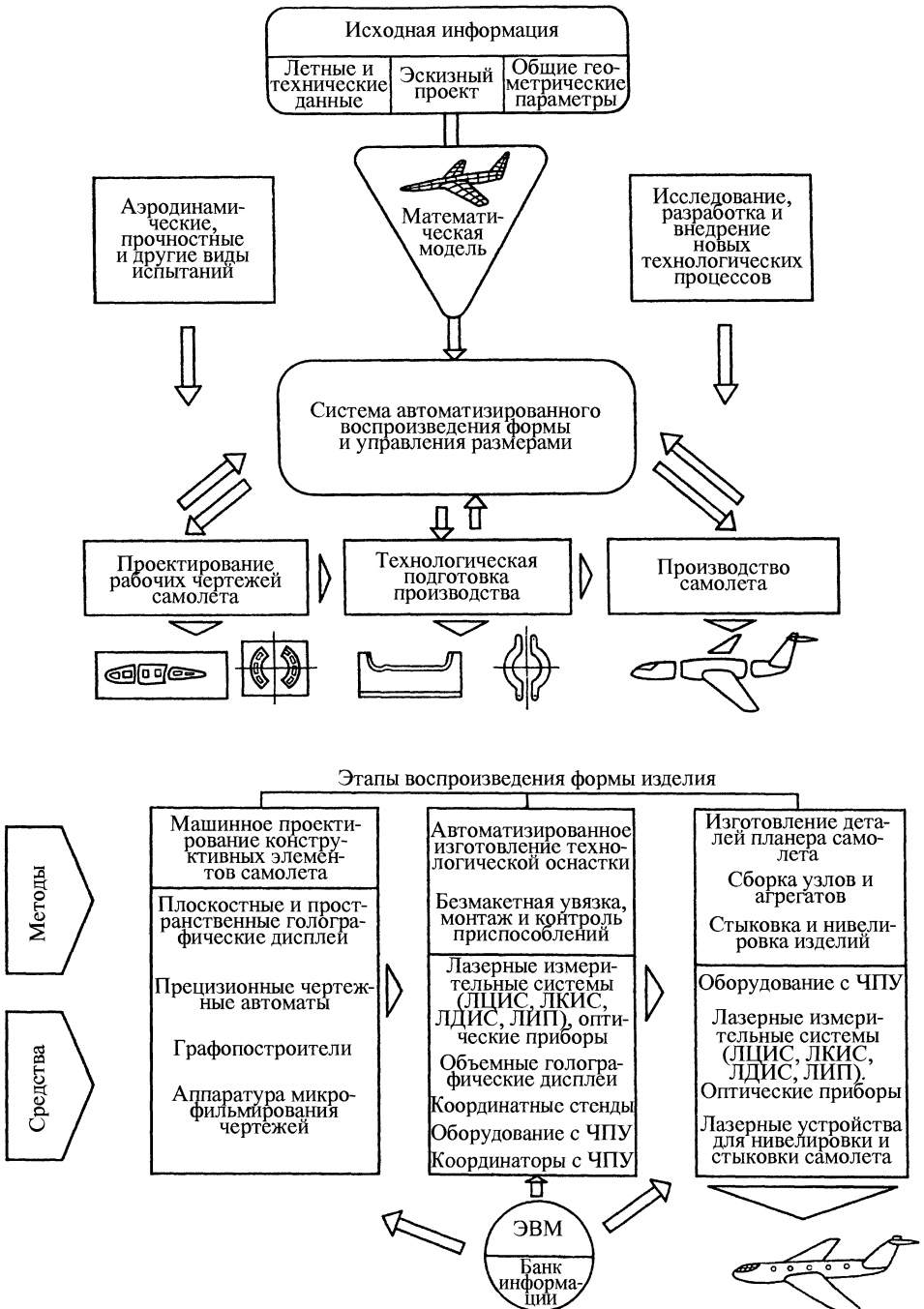


Рис. 8.13. Схема системы автоматизированного воспроизведения формы и управления размерами при машинном проектировании самолетов

ЛКИС – система контурного контроля обеспечивает контроль формы детали обмером ее отдельных сечений. С помощью ЛКИС можно контролировать изготовление таких элементов технологической оснастки, как штампы, пресс-формы, обтяжные пуансоны и пр.).

ЛДИС позволяет контролировать размеры длинномерных деталей, проверять габариты узлов и агрегатов, расположение базовых плоскостей технологической оснастки, контролировать размещение стыков и выполнять другие виды работ, где использовать обычные средства линейных измерений невозможно.

ЛИП – лазерные интерферометры – наиболее точные измерительные средства, предназначенные для прецизионных измерений методом перемещений, соизмеряемых с длиной световой волны. Эти средства используют в качестве исходных эталонных мер длины для аттестации измерительных машин, координатных станков, оборудования с ЧПУ и других видов высокоточных измерений.

Структурная схема лазерного устройства для центрирования объектов. Одной из наиболее важных областей практического применения газовых лазеров является использование их в устройствах для центрирования объектов по лазерному лучу. Эти устройства широко применяют при выполнении монтажных и контрольных работ в машиностроении, строительстве, геодезии, для прокладки тоннелей и пр.

Для центрирования и контроля геометрических параметров крупногабаритных конструкций, монтажа технологической оснастки, сборки изделий, разметки в самолетостроении применяют ЛЦИС. В качестве эталона прямолинейности в этих системах принимается энергетическая ось лазерного луча.

Лазерная центрирующая измерительная система представляет собой оптико-электронные устройства, состоящие из ряда типовых блоков. Кроме того, система снабжена специальной установочной ос-

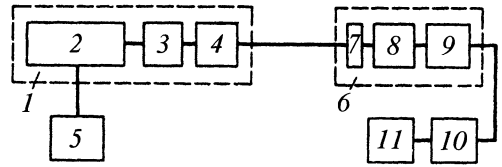


Рис. 8.14. Блок-схема лазерной центрирующей измерительной системы (ЛЦИС):

- 1 – излучатель; 2 – газовый лазер;
- 3 – модулятор; 4 – коллиматор;
- 5 – стабилизированный блок питания лазера;
- 6 – позиционно-чувствительный целевой знак (ПЧЦЗ); 7 – светофильтр; 8 – анализатор положения луча; 9 – фотоприемник;
- 10 – усилитель ПЧЦЗ; 11 – блок индикации

насткой для базирования приборов. Простейшая блок-схема ЛЦИС (рис. 8.14) состоит из излучателя 1, включающего гелий-неоновый лазер 2, модулятор излучателя 3, коллиматор 4; блока стабилизированного питания лазера 5; позиционно-чувствительного целевого знака (ПЧЦЗ) 6, в который входят светофильтр 7, анализатор положения луча 8, фотоприемник 9, блок усиления сигналов (ПЧЦЗ) 10; блок индикации (ПЧЦЗ) 11.

Назначение излучателя ЛЦИС – создание узконаправленного, ориентированного в пространстве лазерного луча в видимой области спектра. Обычно для этих целей применяют гелий-неоновые лазеры, работающие в одномодовом режиме. Позиционно-чувствительный целевой знак является тем элементом системы, с помощью которого определяется положение объекта по отношению к энергетической оси лазерного луча. В зависимости от поставленной задачи ПЧЦЗ могут быть конструктивно выполнены таким образом, чтобы контролировать две, три, четыре и даже пять координат объекта. Зарегистрированные ПЧЦЗ сигналы поступают в блок усиления или непосредственно на индикаторное устройство с цифровой, стрелочной или другой индикацией, отображающей результат измерения. Рассматриваемая блок-схема (см. рис. 8.14) является общей. В каждом конкретном

случае, в зависимости от принятого метода центрирования, она может быть дополнена специальными блоками.

Основное преимущество этих систем перед обычными оптическими приборами – объективность измерений и центрирование протяженных объектов в трехмерном пространстве с достаточно высокой точностью (порядка 10^{-7} рад).

В настоящее время разработано большое количество методов центрирования и выставления объектов по лазерному лучу, которые отличаются физическими принципами, лежащими в основе получения информации о положении объекта в трехмерном пространстве. Эти методы, с одной стороны, характеризуются способами создания опорного направления, с другой, – способами приема информации о положении объекта и ее отображении в блоках индикации. По способам приема информации эти методы могут быть разделены на визуальные, фотоэлектрические и фотоэлектронные.

Создание опорного направления для центрирования объектов связано с выделением в луче зон симметрии, ось раздела которых могла бы быть принята в качестве реперной оси. Наиболее оптимальным решением явилось бы создание реперной оси в виде тонкого лазерного луча. Однако создать тонкий луч большой протяженности практически невозможно из-за процессов дифракции, так же как и невозможно создать абсолютно параллельный лазерный луч.

Для центрирования разработано большое количество позиционно-чувствительных фотоэлектрических приемников на базе фоторезисторов, фотодиодов и фотоумножителей.

При создании этих датчиков используют также новые физические явления и эффекты: продольный и магнитоконцентрационный эффекты в полупроводнике, фотоэффект на границе полупроводниковых монокристаллов, различные явления в оптических анизотропных средах и т.п.

Определение оптического искажения прозрачных материалов. Основными оптическими недостатками стекол, по которым их бракуют, являются одностороннее смещение предметов, нарушение пропорции частей рассматриваемых предметов, искривление линий (особенно линии горизонта), приближение, удаление, удвоение и исчезновение предметов. Причем только одностороннее смещение можно объяснить наличием абсолютного оптического искажения.

Если пластина имеет по всей поверхности одинаковое или мало изменяющееся абсолютное оптическое искажение, то лучи, бывшие параллельными, остаются такими же и после прохождения через пластину. При таких условиях единственным результатом оптического искажения будет одностороннее смещение изображения предмета. Приближение и удаление предметов, искривление линий и нарушение пропорциональности размеров возможны только в том случае, если в стекле абсолютное оптическое искажение будет неодинаково в различных точках.

Оптическое искажение с достаточной полнотой можно охарактеризовать тремя величинами: абсолютным оптическим искажением, "игрой изображения" и искажением линии горизонта.

Абсолютное оптическое искажение – максимальное смещение от первоначального направления пучка света или, как принято на практике, плоского теневого или светового пучка, проецируемого с помощью проекторов.

Игра изображения – разность углов наибольшего (алгебраически) отклонения теневого пучка.

Искажение линии горизонта – разность углов наибольшего и наименьшего углов отклонения теневого пучка на границе переходов от стекла к стеклу.

Оптическое искажение плоских стекол определяют на установке, схема которой представлена на рис. 8.15.

Проектор состоит из лампы, кожуха, оптической системы, штатива и источника питания лампочки.

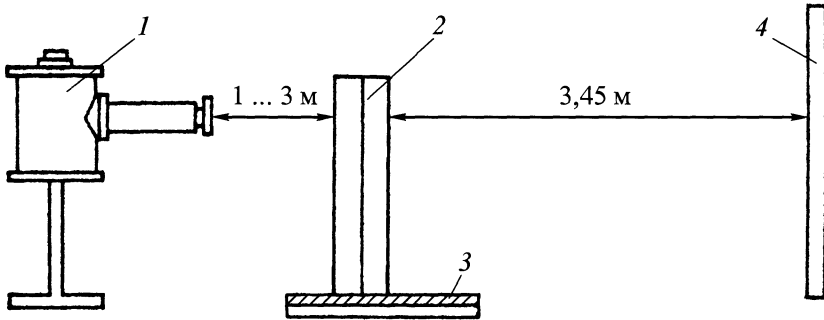


Рис. 8.15. Схема установки для определения оптического искажения:

1 – проектор; 2 - испытуемый лист органического стекла; 3 – смотровой стол; 4 – экран

Оптическая система состоит из креста нитей, проецирующей линзы и трубы с фланцем. Крест нитей находится на оптической оси системы. Проецирующая линза фокусирует изображение креста нитей на экран.

Перемещение креста нитей в горизонтальном направлении осуществляется поворотом кожуха и оптической системы как целого вокруг стержня штатива с помощью микрометрического винта, в вертикальном направлении – наклоняя весь штатив с помощью установочных винтов, находящихся в его треноге. Стержень шта-

тива может немного перемещаться вверх и вниз для установки осветителя на нужную высоту.

Для определения оптического искажения сначала фокусируют изображение нитей на экране, после чего перемещением микрометрических винтов проектора добиваются совмещения проекции нити с его пунктирными центральными линиями (при этом образец не вставлен), затем медленно продвигают образец прозрачной пластинки через проецируемый пучок последовательно в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Наблюдатель у экрана отмечает положение проекции нити.

При отсутствии "игры изображения" отмечают и записывают максимальное смещение проекции нити при обоих взаимно перпендикулярных положениях образцов прозрачной пластины.

На рис. 8.16 представлены два случая оптического искажения: в правой части – одинаковое отклонение проекции по всей длине, в левой – односторонний сдвиг проекции нити и ее искривление ("игра изображения"). "Игра изображения" характеризуется разностью крайних положений искривленной проекции нити. В данном случае "игра изображения" составляет $3'$. Угловое смещение горизонта в деталях определяется при нахождении величины абсолютного оптического иска-

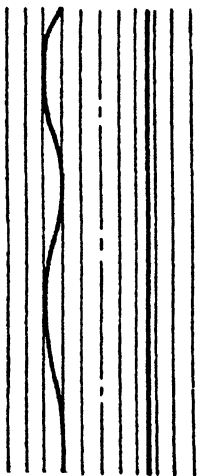


Рис. 8.16. Примеры абсолютного оптического искажения и "игры изображения"

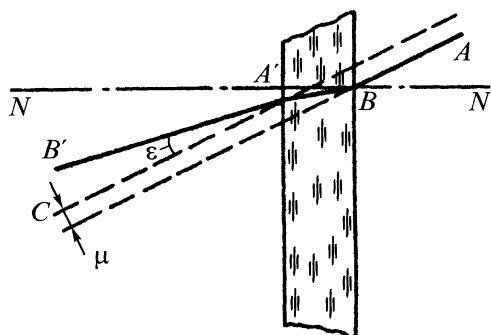


Рис. 8.17. Линейное смещение луча вследствие его углового отклонения

жения. При этом за величину углового смещения линии горизонта принимают максимальное расстояние между частями проецируемой нити на границах соседних деталей.

Оптические искажения стекол могут также оцениваться угловым смещением луча, диапазоном изменения углового смещения, "игрой изображения" и размывом изображения щели проектора (светового пучка).

Угловое смещение луча определяется углом между направлениями луча AB , падающего на поверхность стекла, и луча $A'B'$, выходящего из детали (рис. 8.17).

Угловое смещение луча $\bar{\epsilon}$ определяется вектором (рис. 8.18), направление которого соответствует направлению углового смещения, а абсолютное значение равно численному значению смещения луча в минутах.

Система координат, указанная на рисунке, выбрана таким образом, что плоскость XOY совпадает с плоскостью детали.

Диапазон углового смещения луча $\Delta\epsilon$ выражается максимальной разностью значений составляющей вектора углового смещения, параллельной выбранному на-

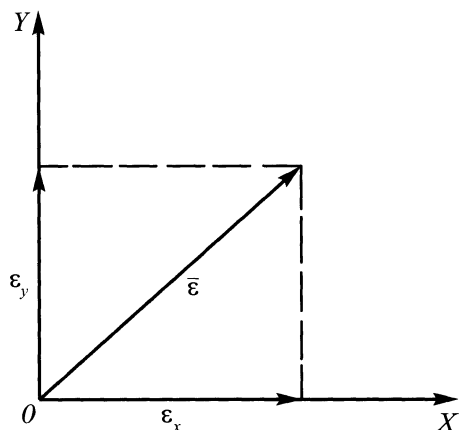


Рис. 8.18. Угловое смещение луча, выражаемое вектором

правлению, в пределах смотрового поля стекла.

"Игра изображения" характеризует нарушение подобия предмета и его изображения, т.е. составляющая вектора углового смещения луча, перпендикулярная к линии изображения, принимает вдоль этой линии различные значения (рис. 8.19). Игра изображения, определяется разностью a значений составляющей вектора углового смещения луча в точках 1 и 2 , находящихся друг от друга на расстоянии l , называемом базой.

Размыв изображения щели проектора оценивается разностью ширины a изображения при прохождении светового луча через стекло и ширины b изображения при отсутствии стекла (рис. 8.20).

Для оценки оптического искажения прозрачного материала по данной методике пригодна любая оптическая установка, позволяющая выявить максимальное абсолютное оптическое искажение с точностью до $1'$. Инструментальная ошибка при этом не должна превышать $0,5'$.

Объектив проектора дает изображение узкой вертикальной щели AB на экране в виде прямолинейного пучка света ши-

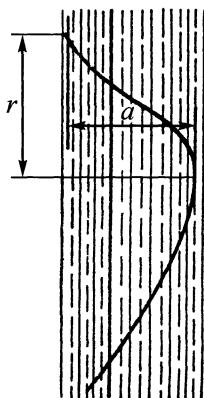


Рис. 8.19. Игра изображения, характеризующая нарушение подобия предмета и его изображения

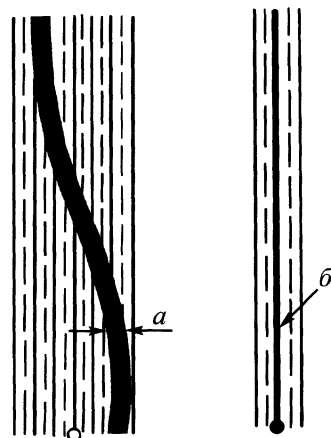


Рис. 8.20. Размыв изображения щели проектора

риной около 11 мм. Испытуемую прозрачную пластинку помещают между зеркалом и проектором на расстоянии ~ 100 мм от зеркала. Расстояние между проектором и зеркалом равно 3440 мм. При таком положении угловому смещению луча на $1'$ соответствует линейное смещение изображения щели проектора на 2 мм.

Деталь устанавливают перед зеркалом перпендикулярно к оптической оси проектора с точностью $\pm 5^\circ$. Юстировку зеркальной установки осуществляют в следующем порядке.

Установкой лампы проектора получают центрированное изображение нити лампы в зрачке объектива, а фокусировкой его – резкое изображение щели AB проектора на экране. Вращением установочных винтов совмещают изображение AB со средней линией на экране с точностью $\pm 0,25'$.

8.2. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МЕТАЛЛУРГИИ

8.2.1. Устройства контроля наличия и геометрии заготовок и раската

Если на линии стана находятся одновременно несколько слитков, принадлежащих различным партиям, и их прокатка

и дальнейшая обработка должны вестись по различным программам, возникает задача слежения за каждым слитком по мере его перехода с одного рольганга на другой. Для такого слежения за слитком в основном применяются индикаторы положения релейного типа. Их используют также для определения длины нераскатанной части, контроля положения слябов в нагревательных печах и на рольгангах и других целей. Для контроля наличия и положения проката на рольгангах применяют фотореле, индуктивные, пневматические и другие индикаторы релейного типа.

Фотоэлектрические индикаторы положения проката. Наиболее простыми и надежными индикаторами положения слябов и раската на транспортных и рабочих рольгангах являются фотореле, работающие от излучения металла или от специальных источников светового излучения. Обычно фотореле устанавливают по краям рольганга и они срабатывают при появлении проката в их поле зрения.

Типовой измеритель положения металла (рис. 8.21) состоит из фотоголовки $ФГ$, располагаемой над рольгангом и имеющей поле зрения, несколько превы-

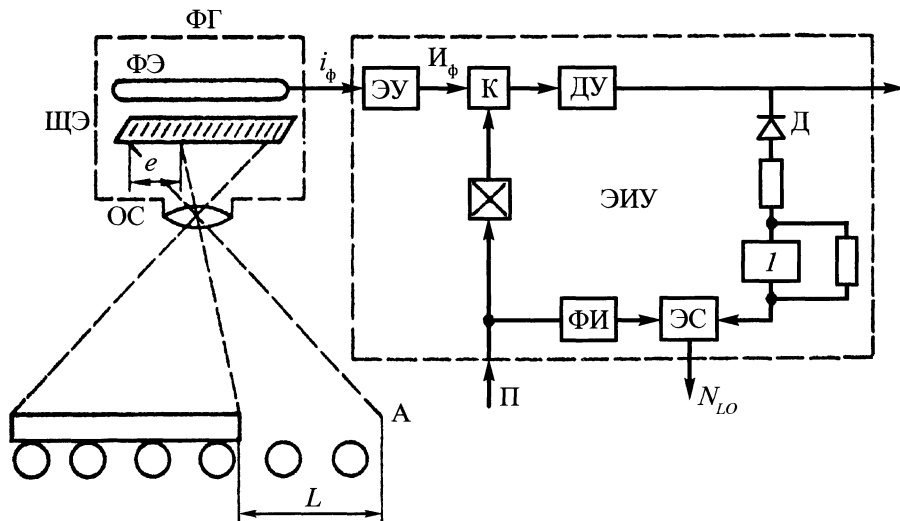


Рис. 8.21. Фотоимпульсный измеритель положения металла

шающее максимальную длину металла, а также электронного измерительного устройства ЭИУ. Фотоголовка снабжена оптической системой ОС, проецирующей изображение участка рольганга вместе с движущимся по нему металлом на щелевой экран ЩЭ, за которым расположен фотозлемент (фотосопротивление). В экране сделаны прорезы в виде решетки, что обеспечивает ступенчатое изменение фототока i_{ϕ} при движении металла по рольгангу. После усиления в электродном усилителе ЭУ напряжение U_{ϕ} , пропорциональное силе тока i_{ϕ} , подается на дифференцирующий усилитель ДУ, с выхода которого снимаются импульсы с частотой f_{ϕ} , пропорциональной скорости движения металла по рольгангу.

Полярность импульсов на выходе ДУ позволяет определить направление движения металла, а их частота – его скорость. Пройдя через заградительный диод Д, отсекающий импульсы положительной полярности, и через усилитель-инвертор I импульсы отрицательной полярности поступают в электронный счетчик ЭС сразу после окончания очередного пропуска

металла. Так как цепь входа ДУ и выхода ЭУ замыкается сигналом П через элемент "нет" во время измерения (например, при отсутствии металла в валках), то счетчик ЭС запоминает длину L, т.е. положение конца металла относительно принятой точки А. Эту длину счетчик выдает в двоичном коде N_{Lo} , сохраняя ее до момента подхода металла к точке А. Тогда через формирователь импульсов ФИ сигнал П вызывает гашение ЭС.

При помощи такого устройства можно определить не только положение переднего конца металла, но и его ускорение при движении.

При выгрузке металла из нагревательных печей основная задача заключается в точном определении положения передней кромки сляба, подготовленного к выдаче, чтобы система автоматизации могла рассчитать и выдать точные задания позиционным регуляторам извлекателя слябов. Положение передней кромки сляба определяют бесконтактным способом при помощи фотореле с источником модулированного света, которые устанавливают на противоположных сторонах окон

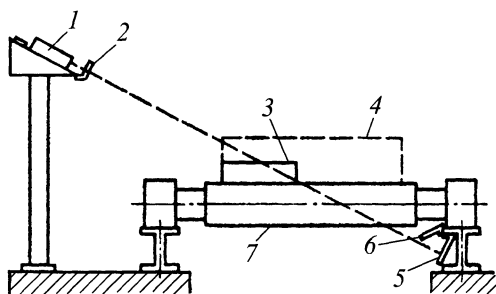


Рис. 8.22. Установка импульсного фотореле для определения положения слэбов на стороне загрузки нагревательных печей:

- 1 – источник и приемник модулированного света; 2 – экран; 3 – слэб минимального размера; 4 – слэб максимального размера; 5 – отражатель; 6 – защитный козырек; 7 – ролик загрузочного стола

выдачи металла. Каждый раз, когда извлекатель, захватив очередной слэб, начинает обратный ход, ЭВМ определяет его точное положение в момент пересечения передней кромкой слэба светового луча соответствующего фотореле.

На стороне загрузки нагревательных печей из-за перемещения механизмов доступ к фотореле затруднен. Один из возможных вариантов установки фотореле показан на рис. 8.22. На каждом участке контроля наличия металла установлены фотореле с совмещенным источником модулированного света на общих подставках, размещенных со стороны загрузочных столов, где расположен пульт оператора загрузки. Модулированные источники света и приемники, настроенные на заданную частоту модуляции, снабжены специальными экранами, защищающими от теплового излучения, что исключает необходимость применения дополнительного охлаждения.

Луч света отражается узким пучком вдоль линии его передачи на отражатель. Это облегчает юстировку угла между осями источника света и его приемника, а также устраняет влияние вибрации отражателя.

Система автоматического контроля длины и ширины раската. При автоматическом управлении прокатными станами при помощи ЭВМ возникает задача непрерывного контроля длины и ширины раската в потоке, а также измерения других геометрических размеров проката. Обычно на прокатном стане устанавливаются 1–2 измерителя длины раската, а ширина полосы измеряется после черновой и чистой групп клетей.

Для измерения ширины проката в горячем и холодном состоянии применяются оптические методы с использованием систем сканирования и без них, а также методы, основанные на применении телевизионной техники.

Жесткие требования к измерителям длины горячего проката в потоке обусловлены спецификой работы устройств контроля и необходимостью получения относительно высокой точности измерения. Устройства контроля длины и ширины должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) измерение должно осуществляться бесконтактным способом;
- 2) должна быть обеспечена требуемая точность измерения;
- 3) устройство должно работать при скорости движения измеряемого изделия 3 ... 20 м/с.

При выборе устройства для измерения длины и ширины проката необходимо учитывать все основные параметры, влияющие на результаты измерения и условия эксплуатации этих устройств.

Для измерения длины горячего проката с высокой точностью при больших скоростях предложен бесконтактный измеритель, принцип действия которого основан на измерении времени прохождения металла через два удаленных на определенное расстояние друг от друга чувствительных элемента (фотореле).

Фотореле перемещаются с постоянной (фиксированной) скоростью параллельно направлению движения измеряемого изделия, но в противоположные от-

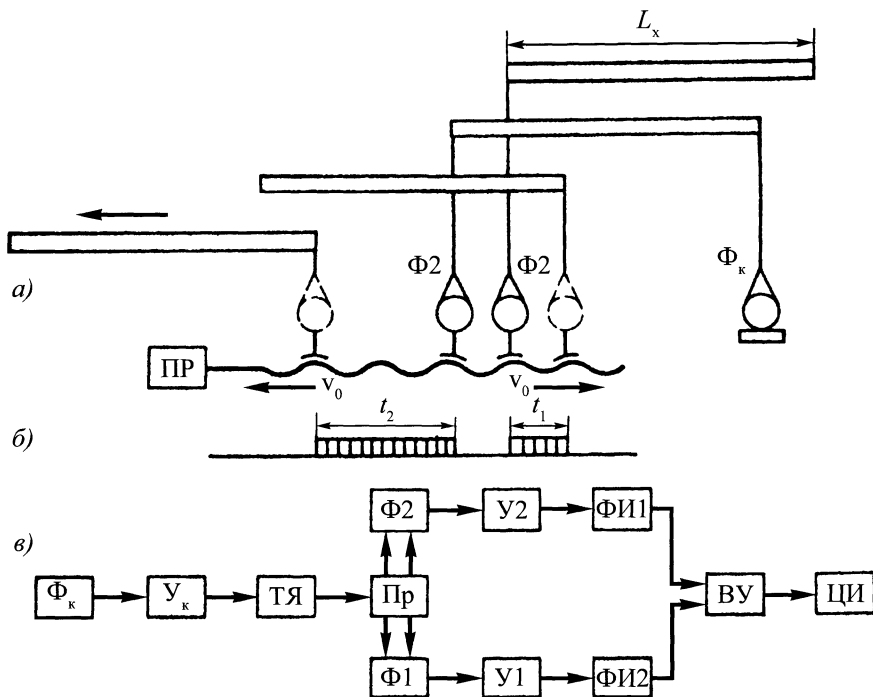


Рис. 8.23. Измерение длины горячего проката в потоке:

a – расположение проката относительно фотореле; *б* – временные интервалы; *в* – принципиальная схема; Φ_k – командное фотореле; Φ_1 и Φ_2 – измерительные фотореле; $У_k$, $У_1$ и $У_2$ – усилители; $ТЯ$ – триггерная ячейка; $\PhiИ1$, $\PhiИ2$ – формирователи импульсов; $ВУ$ – вычислительное устройство; $ЦИ$ – цифровой индикатор; $ПР$ – привод перемещения измерительных головок

носительно друг друга стороны. Время нахождения изделия в поле зрения каждого фотореле измеряется отдельно. Линейный размер изделия определяется вычислительным устройством.

Перемещение чувствительных элементов в противоположных направлениях дает возможность исключить из расчета определения длины скорость перемещения проката. В качестве измерительных фотореле используют импульсные фотореле с широким углом зрения, позволяющие фиксировать во времени момент появления концов изделия с довольно высокой точностью.

Принцип работы измерителя длины заключается в следующем. При засветке передним концом горячего металла чувст-

вительный элемент командного фотореле Φ_k (рис. 8.23) дает команду на поиск приво-ду $ПР$ перемещения измерительных фотореле Φ_1 и Φ_2 .

При пересечении передним концом изделия поля зрения движущихся измерительных фотодиодов Φ_1 и Φ_2 последние дают команду о времени t_1 и t_2 прохождения изделием каждого фотореле в отдельности.

Отсчет времени прекращается при выходе заднего конца изделия из поля зрения каждого датчика.

Для проведения необходимых математических вычислений по определению и цифровой индикации длины изделия оба временных интервала t_1 и t_2 переводятся в пропорциональное число импульсов с по-

мощью генератора импульсов с высокой стабилизацией частоты.

Математические операции проводят при помощи дискретных решающих устройств, которые выдают результаты также в виде числа импульсов. Последние на приборе цифровой индикации будут показывать длину измеряемого изделия. Возвращение измерительных фото головок в исходное положение происходит при помощи конечных выключателей.

Для определения линейных размеров проката в холодном и горячем состоянии разработано бесконтактное оптическое устройство типа "Opstrast". Устройство предназначено для измерения длины и ширины толстолистового проката в диапазоне 500 ... 5000 мм.

Нагретый прокат при помощи объектива проецируется на растровую линейку. В растровой линейке имеется 1000 отверстий, соединенных с соответствующими световодами. Концы световодов разведены по соответствующим отверстиям, расположенным по окружности неподвижного круглого диска – шупового статора. При измерении параметров горячего проката объект сам является источником света и его размеры определяются числом освещенных отверстий растровой линейки, т.е. числом освещенных отверстий шупового статора. Например, если измеряемый объект освещает 410 отверстий растровой линейки, то на окружности шупового статора также освещается 410 отверстий.

Соосно со шуповым статором расположен вращающийся круговой диск – шуповой ротор, на окружности которого находится отверстие, связанное световодом с фотодиодом. При вращении ротора отверстие на его окружности проходит последовательно мимо всех отверстий на окружности статора. Таким образом, число освещенных отверстий на статоре превращается в число световых импульсов, поступающих на фотодиод, превращающий световые импульсы в электрические,

затем усиливающиеся усилителем. Электрические импульсы, поступающие с выхода усилителя, подсчитываются электронным счетчиком. Результаты подсчета поступают на дешифратор, где приводятся к соответствующим единицам длины, и указываются на световом табло. Измеренную длину можно одновременно регистрировать на печатном устройстве.

В зависимости от типа объектива и расстояния между прокатом и измерительным устройством максимальные размеры проката – 500 ... 5000 мм.

При измерении линейных размеров холодного проката объект освещается источником инфракрасного излучения.

Конструктивно измерительная часть устройства встроена в пыленепроницаемый чугунный кожух, который при необходимости охлаждаются водой.

Разработан оптический прибор для измерения ширины холодного и горячего металла и других непрозрачных материалов типа "Widscan". Этот измеритель состоит из двух частей: оптической сканирующей системы и регистрирующего устройства. Работа измерителя ширины не зависит от скорости прокатываемого металла. Разрешающая способность при измерении движущейся полосы, имеющей ширину 1270 мм, составляет 2,5 мм при боковом смещении до 610 мм и установке измерителя на высоте 3048 мм над полосой. Сканирующее устройство устанавливается обычно на расстоянии нескольких метров над измеряемой полосой, регистрирующее – на любом требуемом расстоянии. Оптическая сканирующая система имеет вращающееся зеркало, которое сканирует полосу с частотой 200 раз в секунду. Эта система обеспечивает выдачу импульсов в цифровой форме на регистрирующее устройство, а также его включение и при отсутствии полосы.

Измерение размеров проката с использованием телевизионной техники и лазеров. Большинство устройств для измерения ширины и длины слябов и слит-

ков определенной формы, основанных на оптическом методе с использованием излучения от постороннего источника света, перед которым перемещается контролируемое изделие, не учитывает изменений формы контролируемого изделия при его перемещении. Изгиб в горизонтальной и вертикальной плоскостях, коробление или овальность резко снижают точность измерения. Метод, основанный на применении телевизионной техники и лазеров, позволяет определять ширину, толщину или длину горячекатаной продукции как во время процесса прокатки, так и после его окончания.

Основным элементом телевизионной установки является электронная лучевая трубка, имеющая фоточувствительную поверхность.

На рис. 8.24 в упрощенном виде представлена поверхность электронной трубки, на которой показано прямоугольное поле, образованное горизонтальными линиями развертки. Продолжительность развертки одной линии может поддерживаться строго постоянной и пропорциональной линейному перемещению электронного луча. Продолжительность развертки всего поля также неизменна.

Измерения толщины, ширины и длины с целью упрощения можно свести к определению положения одной или нескольких точек изображения. Каждая рассматриваемая точка может перемещаться вдоль горизонтальной линии h , либо вертикальной v . В момент прохождения электронным лучом точки P происходит резкое усиление сигнала по отношению к основному фону. Для определения точки P необходимо измерить интервал времени Δt между моментом импульса и концом развертки (участок PH) или концом поля изображения (линия PV). При некоторой протяженности объекта расстояние между точками P и P' , перемещающимися по горизонтальной h или вертикальной v линиям, пропорционально времени прохождения электронного луча от одной точки к другой.

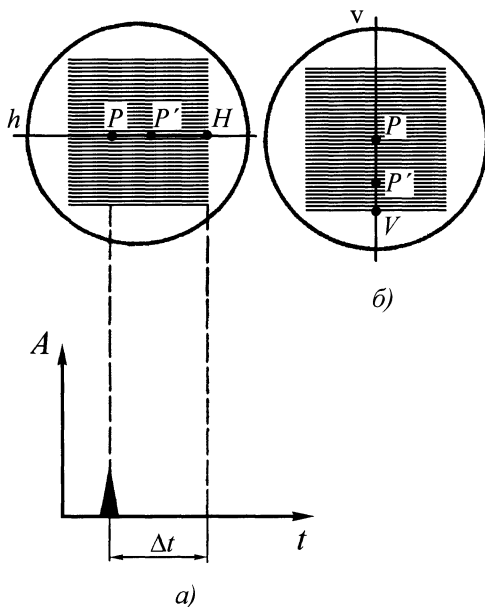


Рис. 8.24. Расположение двух точек на поверхности электронной трубки

Для измерения ширины горячего проката НИИЧерметом предложена телевизионная измерительная установка с высокой частотой развертки, на несколько порядков превышающей скорость перемещения кромок полосы, что сводит к минимуму динамическую ошибку. Электрическая часть измерителя имеет следующие системы, каждая из которых состоит из передающих телевизионных камер 12, 13 (рис. 8.25) на диссекторе, элементов сравнения и усиления рассогласований. Усиление регулируется автоматически, вводится также компенсация теплового расширения, что позволяет уменьшить погрешность до $\pm 0,2$ мм при диапазоне измерения 100 ... 500 мм. Измеритель устанавливается на полосовых станах на расстоянии 2 м над горячим прокатом.

Для измерения ширины раската на толстолистовом стане с использованием средств телевизионной техники и оптических измерительных устройств необходимо располагать раскат в поле зрения измерительной головки. При этом следует учитывать выброс (отвод) раската на значи-

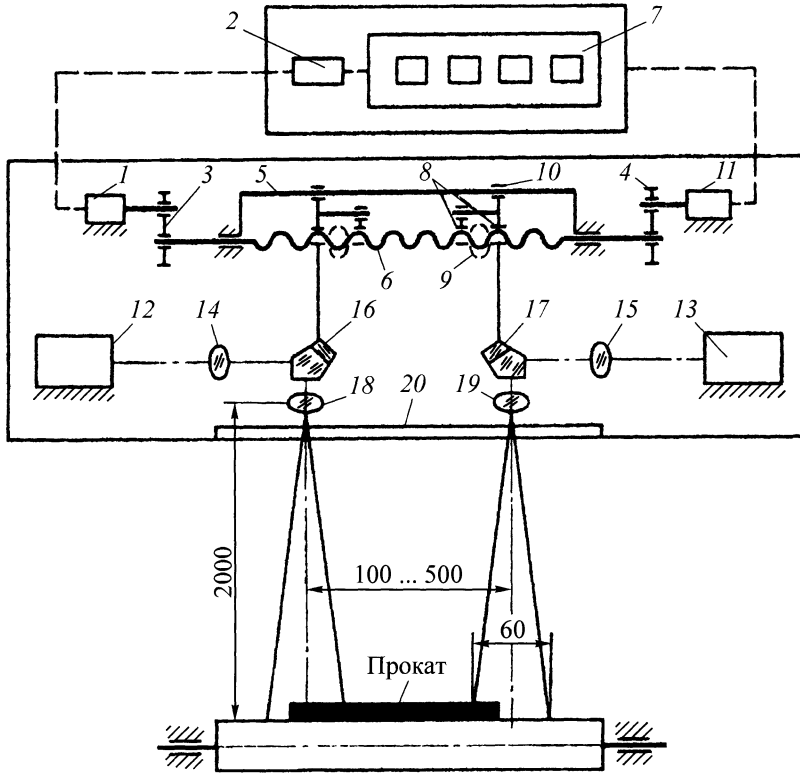


Рис. 8.25. Измеритель ширины листа с высокой частотой развертки телекамер:

- 1, 2 – сельсин-датчик и приемник; 3, 4 – повышающая и понижающая кинематические передачи; 5 – направляющая; 6 – ходовой винт; 7 – счетчик; 8 – гайка; 9 – пружина; 10 – ползун; 11 – электродвигатель; 12, 13 – передающие телекамеры; 14–19 – элементы оптической системы; 20 – защитное стекло

тельное расстояние от оси валков. Поэтому на реверсивных станах их можно использовать только при измерении конечных размеров листа. Проведение измерений в процессе проката привело бы к снижению производительности стана.

Недостаток таких измерительных устройств состоит в необходимости размещения над рольгангами механических конструкций, а также в том, что на работе устройств неблагоприятно отражается применение гидросбива на листовых станах, так как при этом вокруг раската образуется завеса из пара и водяных брызг. Кроме того, эти устройства не исключают

ошибок, возникающих из-за непараллельности осей листа и линии прокатки вследствие изгиба концов раската.

8.2.2. Измерение скорости проката

Принцип работы устройства для бесконтактного измерения скорости движения проката основан на применении оптических растров. Оказалось, что при прохождении светового потока от движущейся поверхности с неравномерным распределением яркости через систему определенным образом расположенных растров (решеток) в выходном световом потоке присутствует независимо от поля яркости

характерная частота, которая служит выходной характеристикой, определяющей скорость движения.

Устройство для измерения скорости движения проката имеет оптическую головку с двумя фотоэлементами (рис. 8.26). Оптическая система головки расположена внутри светонепроницаемой камеры. Световой поток от движущегося объекта проходит через диафрагму и линзу 1. После прохождения через растры 2 и 3 поток разделяется с помощью зеркальной призмы 4 на два Φ_1 и Φ_2 . Каждый из этих потоков, пройдя через фокусирующие линзы 5, попадает на фотоэлемент 6. Оптическая головка расположена так, что плоскость раската располагается в фокальной плоскости входной линзы 1. Тем самым между линзами 1 и 5 обеспечивается параллельность лучей, исходящих от каждой точки раската.

Важнейшим элементом измерительного устройства являются растры a и b (рис. 8.27), изготовленные фотографическим способом. Растр a представляет собой систему чередующихся непрозрачных и прозрачных полос с периодом $d = 0,2$ мм, растр b – систему таких же полос, разделенных средней линией, со смещением полос одной половины растра на полпериода по отношению к другой половине. Применение растра b обеспечивает возможность осуществления дифференциальной схемы включения фоточувствительных элементов. Растры в устройстве расположены параллельно на расстоянии ~ 24 мм. Вектор скорости движения проката перпендикулярен штрихам решеток и параллелен их плоскости.

Фотоэлементы включены по дифференциальной схеме. Выходной сигнал снимается с нагрузки R_n . Применение дифференциальной схемы позволяет увеличить в два раза полезный сигнал и в значительной мере подавить помехи. При помощи резистора R_n дифференциальная схема балансируется.

В настоящее время предложен новый метод определения скорости непрерывно

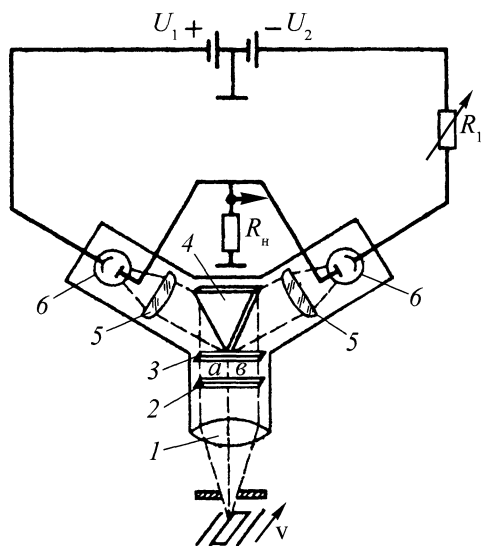


Рис. 8.26. Оптическая головка устройства для измерения скорости движения проката:
1 – линза; 2, 3 – растры; 4 – призма;
5 – фокусирующие линзы; 6 – фотоэлементы

движущегося и холодного листового проката. На движущуюся полосу при помощи проектора направляется пучок света, который позволяет получать на полосе светлое пятно строго ограниченных размеров. При помощи этого же проектора на освещенный участок полосы проецируется сетка темных линий, которые располагаются перпендикулярно направлению движения полосы. Отражаемый от полосы свет через систему линз попадает на фотоэлемент, сигнал выходного тока которого усиливается и поступает на индикатор. Шкала индикатора проградуирована непосредственно в единицах скорости. Фотоэлемент фиксирует изменения отраженного светового потока, который складывается

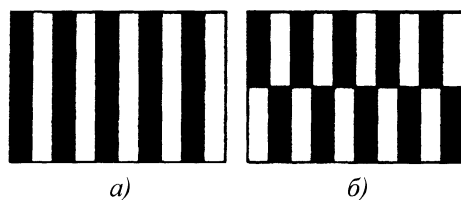


Рис. 8.27. Оптические растры

ся как из лучей видимой части спектра, так и из инфракрасного излучения. Частота этих измерений прямо пропорциональна скорости перемещения полосового материала. Это позволяет при помощи специального преобразователя получать на индикаторе данные непосредственно в единицах скорости.

Такое устройство может быть применено также для измерения скорости горячего полосового материала, но в этом случае в качестве отраженного света используется световое излучение самой полосы, а на ее поверхность проецируется только сетка поперечных темных линий.

Одним из перспективных методов измерения скорости горячего и холодного движущегося металла является корреляционный метод, предложенный Британской научно-исследовательской ассоциацией черной металлургии BJSRA. Этот метод основан на корреляции двух случайных, подобных, сдвинутых во времени сигналов, зависящих от неравномерности коэффициента отражения вдоль прокатываемой полосы металла. Для этого на движущуюся поверхность металла проецируются два одинаковых световых штриха, сдвинутых вдоль оси прокатки на расстояние L . Отраженные световые потоки от этих штрихов раздельно воспринимаются двумя фотоумножителями. В результате на выходе их получают подобные непрерывные сигналы, сдвинутые во времени на t в соответствии с расстоянием между световыми штрихами, и скорость движения полосы определяется из уравнения

$$v = L / \tau.$$

Измерение скорости прокатки с применением лазерной техники. Для измерения скорости может быть использован эффект "зернистости" светового луча лазера. Наблюдение за рассеянно отраженным светом лазера на поверхности показывает, что он не имеет равномерной интенсивности, а обладает так называемой "зернистостью", т.е. состоит из белых и

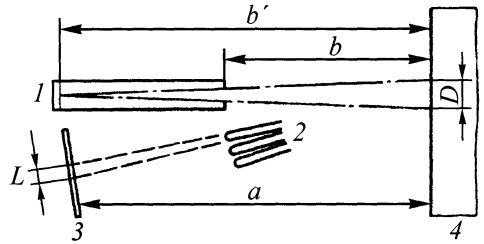


Рис. 8.28. Возникновение зернистости при диффузном отражении лазерного луча:

1 – лазер; 2 – луч; 3 – экран наблюдателя;

4 – диффузно отражающий объект

черных пятен. Средняя величина пятна этой структуры не зависит от отражающей поверхности предмета, если только поверхность не является зеркалом и не имеет систематизированной структуры.

Этот эффект является следствием того, что элементы поверхности в пределах светового поля D (рис. 8.28) вследствие когерентности света от лазера имеют определенное фазовое взаимоотношение с отраженным излучением. Это приводит к явлениям интерференции.

Средний размер пятна, определяемый как полуширина зоны интенсивного освещения, можно найти, рассматривая пучки лучей, исходящие от отраженного светового поля, при помощи уравнения для источника излучения света:

$$L = 1,22 \frac{\lambda}{D} a,$$

где a – расстояние между объектом и плоскостью наблюдения; λ – длина световой волны.

Среднее расстояние между двумя световыми точками составляет $2L$. Диаметр D падающего на экран лазерного луча без применения фокусирующей оптики зависит от диаметра d светового луча на выходе из лазера и дивергенции этого луча, а также от расстояния до объекта b . При выборе D равным полуширине зоны интенсивного освещения в плоскости встречи, получаем при малых углах

$$D = 1,22 \frac{\lambda}{d} b + d.$$

Это уравнение можно также записать в форме

$$D = 1,22 \frac{\lambda}{d} b',$$

где b' – расстояние от точки встречи до предполагаемой точки, из которой выходит слабо расходящийся луч лазера; $b' = b + d^2 / 1,22\lambda$.

Размер светового пятна L получаем из уравнения

$$L = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 1,22 a \frac{\lambda d}{1,22\lambda b'} = d \frac{a}{b'}.$$

Если экран для наблюдения установлен в точке дивергенции (предполагаемой) луча лазера, то при $a = b'$ размер светового пятна, как и диаметр d светового луча, выходящего из лазера, становится независимым от расстояния от объекта до измерительного устройства.

При фокусировании луча лазера через выпуклую линзу на объект световые пятна в плоскости наблюдения становятся меньше. Однако это возможно только в определенных пределах, которые при применении системы линз могут быть несколько изменены.

Если световой луч движется по отражающей поверхности или движется сама поверхность, то перемещаются также световые пятна в плоскости наблюдения, причем отдельные пятна постоянно исчезают и возникают новые. Скорости движения светового пятна и объекта пропорциональны.

Светочувствительный приемник, расположенный в плоскости наблюдения, регистрирует последовательность колебаний или световых импульсов. Эта последовательность, как и расположение световых пятен, является величиной усредненной, так что при неизменной скорости движения среднее значение частоты импульсов постоянно и может быть использовано как измеряемая величина.

При постоянной скорости амплитуда и частота импульсов зависят от размера световых пятен и площади приемника. Амплитуды световых импульсов, принимаемых приемником, неодинаковы в результате того, что отдельные световые пятна попадают на приемник полностью или только частично. Так как на сигнал неизбежно накладываются сигналы помех, то преобразующая схема должна использовать только те световые колебания, которые имеют амплитуду больше выбранного порога срабатывания.

При получении постоянного коэффициента отражения от движущегося облучаемого тела можно заключить, что скорость движения последнего пропорциональна средней частоте импульсов. Это позволяет измерять относительную скорость. Средняя частота импульсов ~ 2 МГц. Однако при применении порога срабатывания частота импульсов уменьшается до 1 МГц. При колебании коэффициента отражения поверхности объекта меняется интенсивность отраженного светового сигнала. Так как при этом меняется также число импульсов, преодолевающих порог срабатывания, то возникают изменения частоты и, следовательно, ложное показание скорости. Если измерения проводятся на однородном материале, эта ошибка незначительна. Кроме того, ее можно компенсировать поддержанием постоянного эффективного значения принимаемого сигнала регулированием усиления.

При этом методе измерения последовательность импульсов подсчитывается статистическим способом. Относительная статическая ошибка зависит от общего числа воспринимаемых импульсов. Она тем меньше, чем больше это число. При постоянной скорости объекта число воспринимаемых импульсов с постоянной длительностью измерения увеличивается и, следовательно, относительная ошибка уменьшается. При этом вследствие необходимости усреднения скорости объекта

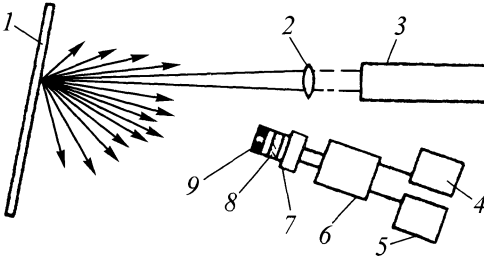


Рис. 8.29. Схема установки для измерения относительной скорости:

1 – движущийся объект; 2 – оптическая система; 3 – лазер; 4 – счетчик импульсов; 5 – аналоговый частотомер; 6 – электронный блок оценки сигнала; 7 – приемник; 8 – интерференционный светофильтр; 9 – диафрагма

при увеличении длительности измерения отдельных импульсов скорость измерения уменьшается. Поэтому вопрос о выборе длительности измерения следует решать в каждом конкретном случае.

В измерительной установке (рис. 8.29) луч от лазера направляется через оптическую систему на движущееся тело. Отраженный свет воспринимается фотумножителем. Вторичная электронная аппаратура преобразует световые сигналы в импульсы и производит их подсчет. Частотомер показывает среднюю частоту импульсов (относительную скорость).

Для проверки пропорциональности скорости движения объекта и частоты импульсов световой луч направляется на край вращающегося диска с постоянным коэффициентом отражения; при этом измеряется частота импульсов в зависимости от частоты вращения диска. Исследования показали, что при времени измерения 0,3 с колебания интенсивности света составляют менее 1 %.

8.2.3. Поточный контроль неплоскостности листового проката

Искажение формы тонколистового проката в вертикальной плоскости, характеризующееся выпучиванием отдельных

участков полос и листов, называют неплоскостностью.

Согласно ГОСТ 21014–75, дефекты плоскостности листовой горячекатаной и холоднокатаной стали, поставляемой по ГОСТ 19903–74 и ГОСТ 19904–74, подразделяются на два вида: 1) волнистость кромки – чередование гребней и впадин (волн), располагающихся по кромкам полосы с одной или двух сторон; 2) коробоватость – кривизна в продольном и поперечном направлениях (одновременное наличие поперечных и продольных волн), корытообразный профиль.

Однако на практике встречается местная неплоскостность, характеризующаяся повышенной вытяжкой на участках малой протяженности.

Оптический датчик с применением источника света и телекамеры. Для определения формы прокатываемой полосы в качестве датчика неплоскостности применяют телекамеру, установленную в плоскости отражения направленного светового потока, создаваемого щелевым источником света от поверхности движущейся полосы. Сканирование производится по трем точкам, расположенным по краям и в центре полосы. Применение телекамеры позволяет регулировать яркость и контрастность изображения, правда в ограниченных пределах, так как яркость будет зависеть в основном от отражательной способности полосы. Это является лимитирующим фактором всех датчиков, основанных на принципе отражения луча света.

Несколько иной принцип оптического датчика неплоскостности защищен японским патентом. Источник света расположен над полосой под определенным углом, обеспечивающим попадание отраженного света в поле зрения оптической системы датчика. Луч света из источника проходит через вращающийся экран с прорезями, что обеспечивает определенную частоту изменения интенсивности света. При прохождении неплоского уча-

стка полосы частота меняется, что ведет к появлению сигнала фотоэлектронных датчиков, установленных в ряд поперек полосы на выходной стороне клетки.

Датчики неплоскостности оптического типа с применением лазера являются значительным прогрессом в области контроля качества поверхности и формы полосы на основе динамического метода вместо визуального, при котором используется вращающееся зеркало, а вместо светового луча – луч лазера.

Разработана лазерная установка, типа "Lasersorter", не имеющая отмеченных недостатков. В качестве источника излучения используется гелий-неоновый и аргоновый лазеры. Свет падает на полигональное отклоняющееся зеркало, обеспечивающее падение на полосу светового пятна диаметром 0,5 мм. Дефекты поверхности размером до 0,1 мм сильно отклоняют отраженный луч. Отраженный свет фиксируется двумя фотоумножителями. Дополнительно два умножителя обеспечивают ограничение по линии визирования по ширине 600 ... 3400 мм. Скорость вращения зеркала и движения полосы синхронизированы. Все измеренные параметры поступают в электронное вычислительное устройство.

Муаровый метод – один из немногих экспериментальных методов, с помощью которого возможно изучение деформации от нестационарных нагрузок. Эффективность метода муаровых полос для регистрации нестационарных процессов доказана на примерах изучения распределения деформации в неустойчивой области образования линий сдвига, проявления текучести в зоне образования шейки у растягиваемых образцов и даже распространения ударных волн в прозрачных телах. Метод позволил составить достоверную картину изменения поля перемещений во времени.

Важное преимущество муаровых методов заключается в возможности измерять перемещения в широком диапазоне

от упругих до больших пластических в интервале 0,1 ... 100 % одним и тем же способом почти с одинаковой точностью. Большое значение имеет и то обстоятельство, что в муаровых методах нет фиксированной базы измерения, так что перемещения можно измерять на любой базовой длине в любой точке поверхности, на которую нанесена или спроецирована сетка.

Распространение отражательного и теневого муаровых методов на изучение распределения углов наклона и упругих прогибов криволинейных поверхностей позволило накопить ценные данные о деформациях пластин и оболочек на лабораторных установках разных конструкций.

При этом получены общие картины полей перемещений, которые невозможно получить другими экспериментальными методами. Определены не только изменения углов и прогибов под действием нагрузки, выявлены даже микронеровности поверхности.

Муаровые методы не требуют сложного оборудования. Достаточно нескольких фотографий муаровых картин на каждом этапе нагружения и простого расчета для полного и точного определения распределения деформаций по исследуемому полю независимо от характера связи между напряжениями и деформациями материала образца. Регистрация перемещений занимает доли секунды.

При определении параметров неплоскостности холоднокатаных листов возможность получения муаровой картины от интерференции раstra с его теньвым изображением на искривленной поверхности полосового металла зависит от кривизны исследуемой поверхности.

Смещение линий исходного раstra относительно его теневого изображения на некоторую величину происходит за счет "оптического рычага" между исходным растром и исследуемой поверхностью и пропорционально зазору u и углу проекции раstra α (рис. 8.30).

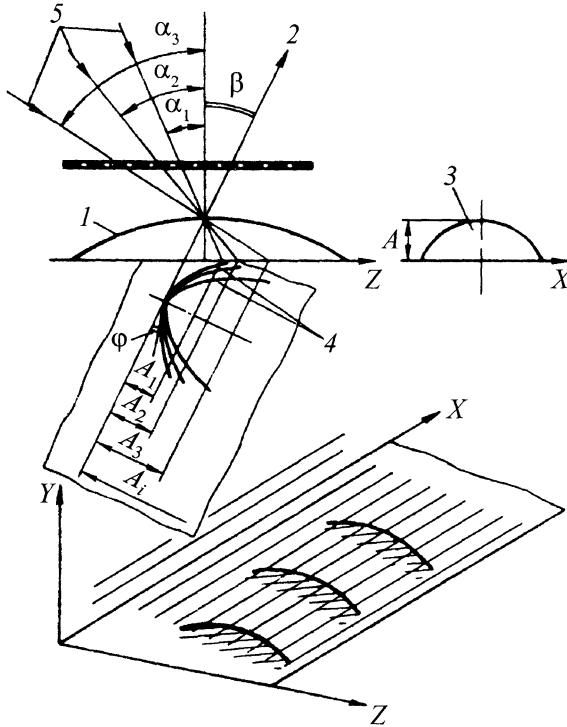


Рис. 8.30. Искажение линий раstra на искривленной поверхности коробоватой полосы:

1 – исследуемая поверхность; 2 – направление фиксирования; 3 – поперечное сечение исследуемой поверхности; 4 – искажение линий раstra; 5 – направление от источника света

Форму неплоскостности листа опишем синусоидой $y = A \sin \omega x$. При проецировании раstra на поверхность металла перпендикулярно гребню синусоиды получается искаженное изображение линий раstra. Величина искажения зависит от угла проекции раstra α между направлением источника света и перпендикуляром к поверхности исходного раstra, а также от направления фиксирования муаровой картины угла β .

Таким образом, между собой интерферируют два раstra: один – исходный, состоящий из семейства параллельных прямых линий, другой – теневой, искаженный поверхностью металла, состоящий из семейства синусоидальных кривых с амплитудой A_i .

При угле проекции $0,788 \text{ рад } (\beta = 0)$ изображение искаженных линий раstra соответствует по форме и размерам поперечному сечению исследуемой поверхности. При увеличении или уменьшении угла проекции амплитуда A_i искаженного изображения линий проецируемого раstra будет больше или меньше амплитуд поперечного сечения исследуемой поверхности A . Этим увеличивается или уменьшается кривизна искаженных линий раstra, а следовательно, и угол сдвига между линиями искаженной и проецируемой сеток раstra (для одной и той же точки поверхности).

Зависимость изменения амплитуды искаженной линии проецируемого раstra от угла проекции α и угла фиксирования β

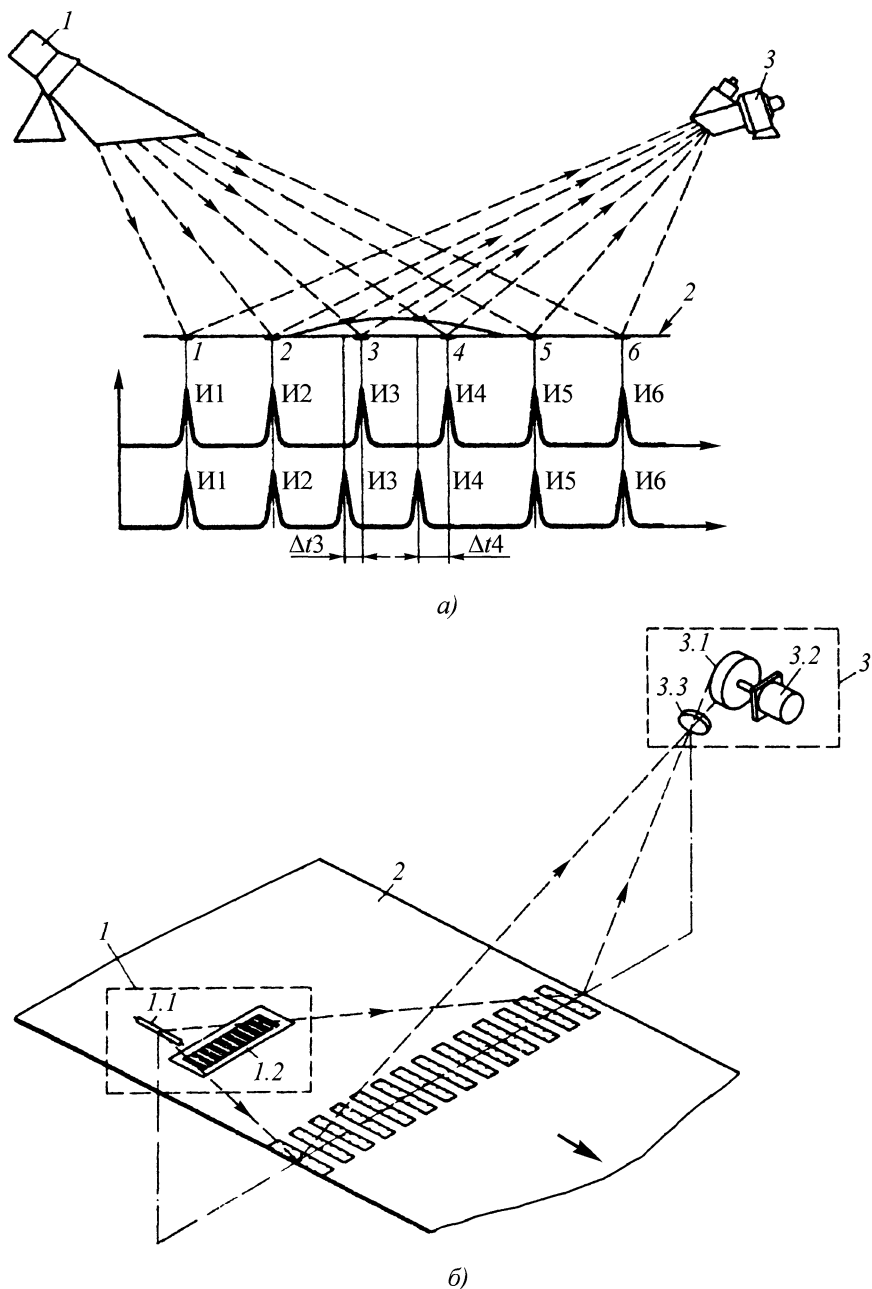


Рис. 8.31. Фотоэлектрическая система контроля формы полосы:

a – принцип измерения; *б* – принцип работы системы контроля; 1 – проекционный блок; 1.1 – линейный источник освещения; 1.2 – растровая маска; 2 – контролируемая полоса; 3 – фотоимпульсный блок; 3.1 – сканирующий барабан; 3.2 – приводной двигатель барабана; 3.3 – объектив; Δt – временной сдвиг

выражается уравнением

$$A_i = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha} A.$$

Анализ искривлений возможен также с помощью телевизионной техники.

Разработана фотоэлектрическая система контроля формы полосы, предназначенная для индикации и оценки величины отклонения формы прокатываемой полосы от плоскости на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки. Подобное отклонение формы характеризуется неравномерностью вытяжки (или удлинения) продольных волокон по ширине полосы. Поэтому измеряется волнистость ряда волокон (рис. 8.31).

Для этого с помощью проекционного блока, установленного сбоку от полосы, проецируется на ее поверхность линейчатый растр, представляющий собой совокупность светлых и темных линий (штрихов), параллельных оси полосы. Фотоимпульсный блок, установленный с другой стороны полосы, сканирует изображение линий раstra в направлении, перпендикулярном к оси полосы. В результате образуется последовательность импульсов I , каждый из которых соответствует определенной полосе раstra. При наличии искажений формы (волнистости, коробоватости) изображение полос раstra смещается в поле зрения фотоимпульсного блока, что вызывает сдвиг во времени соответствующих импульсов относительно начала развертки. По величине сдвига определяется искажение формы. Результат контроля индицируется на экране дисплея линией, форма которой отображает распределение неплоскостности по ширине полосы.

Отличительными особенностями системы являются контроль неплоскостности полосы методом оптической триангуляции в 16 точках, равномерно распределенных по ширине полосы, что обеспечивает достаточно высокую разрешающую способность системы.

Размещение проекционного и приемного фотоимпульсного блоков по обе стороны отводящего рольганга стана повышает надежность работы аппаратуры и облегчает ее обслуживание.

Показания системы могут быть использованы оператором стана для управления формой путем перераспределения обжатий по ширине полосы, например, с помощью гидроизгиба валков. Выходные сигналы могут быть также использованы для автоматического регулирования формы полосы.

8.3. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В НЕФТЕГАЗОВОМ КОМПЛЕКСЕ

8.3.1. Оптические методы контроля нефтепродуктов в процессе транспортировки

Фотоэлектрические колориметры.

Колориметрический метод контроля за последовательной перекачкой осуществляют сравнением цвета окраски перекачиваемых нефтепродуктов. Концентрацию одного нефтепродукта в другом определяют по интенсивности окраски их смеси на основе закона Ламберта–Бера:

$$\Phi_{\lambda} = \Phi_{0\lambda} e^{-\alpha Cl},$$

где Φ_{λ} – поток монохроматического излучения с длиной волны λ , выходящего из поглощающего вещества; $\Phi_{0\lambda}$ – поток монохроматического излучения с длиной волны λ , входящего в анализируемое вещество; α – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны излучения, природы растворенного вещества и температуры; C – концентрация растворенного вещества; l – толщина поглощающего слоя.

Это уравнение можно представить в виде интенсивностей световых потоков $I_{0\lambda}$, I_{λ} соответственно до и после поглощения в слое растворенного вещества:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-\alpha Cl}.$$

Преобразованием этого уравнения можно получить значения основных фотометрических величин: пропускания τ и оптической плотности D поглощающего вещества:

$$\tau = \frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda}} 100 \% ; D = \lg \frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda}} = \alpha C l.$$

Отсюда следует, что оптическая плотность прямо пропорциональна концентрации вещества в растворе. Если изменение концентрации C раствора красителя или любого химического компонента вызывает изменение α , то будем иметь отклонение от закона Ламберта–Бера.

Для оценки разрешающей способности колориметрического метода контроля за цветом образцов нефтепродуктов необходимо снять их спектральные характеристики в видимом диапазоне спектра 0,4 ... 0,77 мкм.

Для повышения избирательности и точности измерений в фотоколориметрии широко применяют корректирующие светофильтры из цветного стекла. Каждый светофильтр обычно представляет собой комбинацию цветных стеклянных светофильтров, подобранных таким образом, чтобы суммарная функция спектрального коэффициента пропускания комбинации приводила спектральную чувствительность фотоприемника к одной из функций сложения цветов.

Рекомендуется два основных типа расположения корректирующих светофильтров. В первом случае цветные светофильтры с выбранными спектральными характеристиками располагают последовательно друг за другом. При этом световой поток, прежде чем попасть на фотоприемник, последовательно фильтруется в каждом фильтре. Другим методом является расположение светофильтров с требуемыми спектральными характеристиками по схеме Дреслера, т.е. некоторые комбинационные компоненты корректирующего фильтра размещают рядом один с другим. Здесь различные части светового потока

по-разному фильтруются цветными стеклами, прежде чем излучение попадет на фотоприемник. Результирующую кривую спектрального пропускания комбинации цветных стекол эффективно можно регулировать, изменяя относительные размеры компонентов фильтра. Выполненные по такому принципу корректирующие светофильтры могут с высокой степенью точности приближаться к идеальным при относительно высоком пропускании в максимумах кривых.

Для каждой конкретной задачи изменения цвета подбор соответствующих светофильтров по двум этим методам обычно выполняют экспериментальным путем. Существуют и расчетные методы. Чувствительность колориметрических измерений растворов также зависит и от правильного выбора фотоприемника с требуемой спектральной характеристикой.

Для определения цвета нефтепродуктов существуют и стандартные лабораторные методы: для смазочных масел, печных и дизельных топлив и других нефтепродуктов по ГОСТ 20284–74 или ASTM D 1500 (США); для этилированных бензинов по ГОСТ 20924–75 или ASTM D 2392 (США).

Во всех этих стандартизованных методах используют колориметрический способ контроля. Следовательно, процесс автоматизации измерения цвета нефтепродуктов на технологическом потоке сводится к разработке и применению автоматических фотоэлектрических колориметров непрерывного действия.

Для непрерывного контроля за цветом нефтепродуктов на технологических потоках промышленностью выпускаются автоматические фотоэлектрические колориметры. В приборах используют дифференциальный метод измерения светопоглощения. Сравнительным образцовым средством может быть светофильтр из цветных стекол или подобранная жидкость с равноценной спектральной харак-

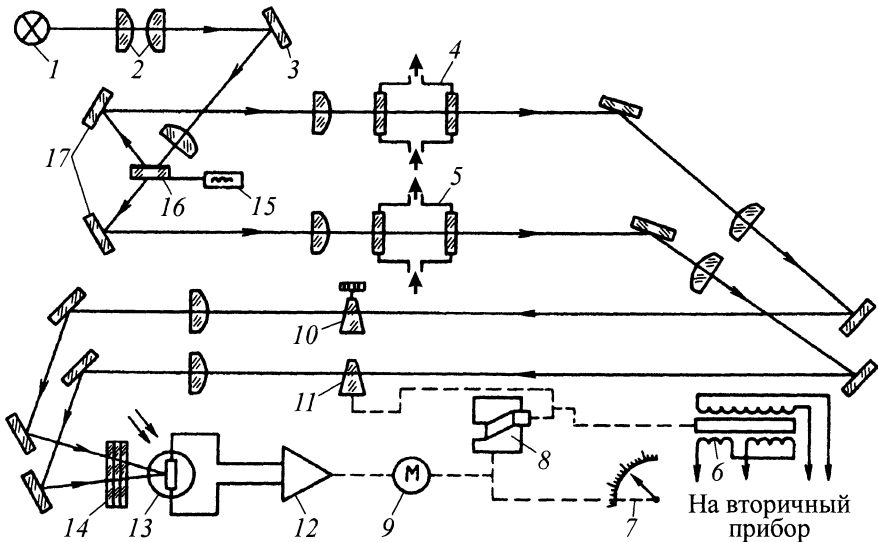


Рис. 8.32. Принципиальная схема абсорбционного фотометра

теристикой. Отношение оптической плотности контролируемого продукта к оптической плотности образцового средства измеряют при помощи оптической системы с электрической компенсацией. Пропорционально изменению отношения оптических плотностей изменяется выходное напряжение, подаваемое на регистрирующий прибор.

Особенностью автоматического абсорбционного фотометра является наличие широкого спектрального диапазона измерения для жидкостей от 0,5 до 2,5 мкм. Фотометр предназначен для непрерывного измерения и регистрации изменений оптической плотности агрессивных и неагрессивных жидких сред, имеющих однозначную функциональную связь между концентрацией и оптической плотностью.

В абсорбционном фотометре (рис. 8.32), световой поток от излучателя 1 проходит через конденсор 2, отражается зеркалом 3, затем с помощью зеркала 16 вибрационного коммутатора-модулятора 15 попеременно направляется на зеркала 17. После этого световой поток проходит

сравнительную 4 и измерительную 5 ветви фотометра.

Оба световых потока системой зеркал и линз направляются на фоторезистор 13. Перед фоторезистором расположен интерференционный светофильтр 14.

В случае неравенства световых потоков, падающих поочередно на фоторезистор, на выходе последнего появляется переменная составляющая напряжения, которая после усилителя 12 подается на управляющую обмотку реверсивного двигателя 9. Фаза этого напряжения, а следовательно, и направление вращения двигателя соответствуют увеличению или уменьшению оптической плотности в измерительном канале.

Реверсивный двигатель при вращении с помощью кулачка 8 перемещает компенсирующий оптический клин 11 в измерительном канале до тех пор, пока интенсивности световых потоков двух каналов не уравниваются. С валом двигателя связана стрелка на шкале 7 фотометра. С компенсирующим клином кинематически связан подвижной сердечник дифференциального трансформатора 6, который служит для дистанционной передачи по-

казаний на регистрирующий прибор. Нулевое показание фотометра устанавливают с помощью нулевого оптического клина 10.

Для настройки и регулировки фотометра (без его отключения на технологическом потоке) на передний фланец шкалы фотометра выведены регулятор усиления, рычажок устройства для просмотра состояния кювет, диск для перемещения нулевого клина, рычажок контроля за работоспособностью следящей системы.

Фотометр имеет три диапазона измерения оптической плотности: 0 ... 0,2; 0 ... 0,5 и 0 ... 1. Основная погрешность измерения $\pm 3\%$ для диапазона 0 ... 0,2 и $\pm 1\%$ для 0 ... 0,5 и 0 ... 1.

Для нефтепродуктопроводов разработан специализированный автоматический фотоэлектрический колориметр погружного типа для контроля за границами раздела последовательно перекачиваемых бензинов.

В верхней части корпуса 1 фотоэлектрического датчика (рис. 8.33) имеется отверстие, закрываемое крышкой 9 с прокладкой 8, обеспечивающее доступ во внутреннюю полость датчика. С двух сторон корпуса установлены штепсельные разъемы 4 и 13. В стенки корпуса герметично вклеены прозрачные защитные окна 7 и 10, которые изготовляют из стекла или пластмассы, пропускающие световой поток в видимой и ИК-областях спектра. Перед защитным окном 7 установлены два источника излучения: 5 для работы в видимой области спектра, 3 для калибровки показаний датчика в ИК-области. Между источником излучения 5 и окном 7 расположен интерференционный светофильтр 6, пропускающий видимую часть спектра, а перед источником излучения 3 установлен инфракрасный интерференционный светофильтр 2.

Перед защитным окном 10 находятся фоторезисторы 12 и 14, воспринимающие световой поток видимой части спектра при контроле за бензином и инфракрасное

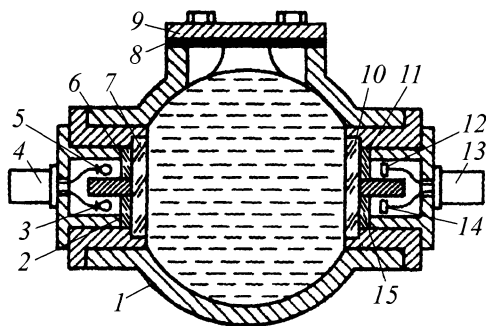


Рис. 8.33. Конструкция фотоэлектрического датчика

излучение при калибровке датчика. Светофильтр 11, установленный перед фоторезистором 12, пропускает излучение в видимом (зеленом) и инфракрасном диапазонах спектра, а светофильтр 15, установленный перед фоторезистором 14, — излучение в видимом (красном) и инфракрасном диапазонах спектра.

Источники излучения 3, 5 и фоторезисторы 12, 14 с помощью проводов подключены к штепсельным разъемам 4 и 13.

Использование зеленого и красного светофильтров повышает чувствительность и точность контроля за цветом перекачиваемых бензинов и их смесей. Например, отношение пропусканий излучения красного и зеленого светофильтров для коммерческого и премиального бензинов изменяется от 0,9 до 7, т.е. максимальный предел отношений на границах раздела бензинов довольно высокий — 8 : 1.

Кроме приведенного датчика в состав фотоэлектрического колориметра входят электронное устройство, блок питания и регистрирующий прибор.

Результаты отечественных и зарубежных исследований, выполненных в течение последних лет, полностью подтвердили не только возможность, но и большое практическое значение возникновения и развития новой области измерительной техники, основанной на самом широком применении волоконно-оптических датчиков (ВОД).

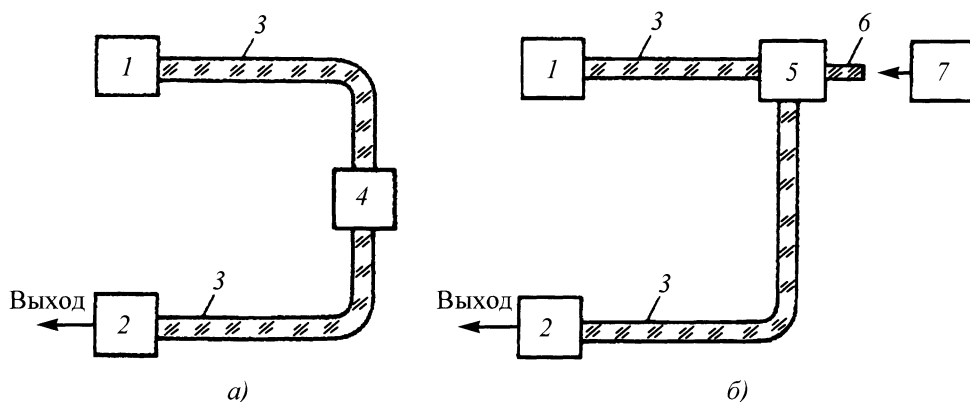


Рис. 8.34. Блок-схема волоконно-оптических датчиков дискретных (а) и с зондом (б):

1 – источник излучения; 2 – приемник излучения; 3 – оптическое волокно; 4 – кювета с анализируемым продуктом; 5 – светоделитель; 6 – волоконно-оптический зонд; 7 – контролируемый объект

Внедрение волоконно-оптических датчиков в процессах транспортирования и хранения нефтепродуктов имеет следующие преимущества: сокращение габаритов и массы коммуникаций и датчиков, высокая чувствительность и помехозащищенность, возможность работы в экстремальных условиях (взрыво- и пожароопасные объекты и т.п.), высокая скорость передачи информации.

Серийно выпускаемые промышленностью изделия волоконной техники дают возможность пересмотреть классическую схему фотометра для адаптации его к конкретным условиям технологического контроля, а также для расширения его функциональных возможностей.

Световодные кабели достаточной длины (до 400 м) позволяют делать кювету выносной. Небольшие энергетические потери излучения в световодном кабеле допускают его наращивание.

По принципу конструирования можно выделить две группы перспективных для разработки волоконно-оптических датчиков: дискретные (рис. 8.34, а) и с волоконно-оптическим зондом (рис. 8.34, б). В дискретных ВОД оптическое волокно используют как устройство ввода-

вывода излучения в дискретный оптически чувствительный элемент. Модуляция светового потока под воздействием внешнего измеряемого фактора происходит в оптически чувствительном элементе, который в зависимости от вида модуляции может иметь различное исполнение.

В датчиках с зондом световое излучение при помощи зонда подводится к объекту, а отраженное объектом – через этот же или другой зонд передается на приемник.

В этих датчиках волокно выполняет роль проводника оптических сигналов, в отличие от ВОД с волоконно-оптическим чувствительным элементом, в котором волокно выполняет активную функцию в процессе детектирования воздействующего внешнего фактора.

В качестве универсального элемента, способного реагировать на различные виды воздействий и являющегося базовым звеном при построении чувствительных элементов преобразователей, используют управляемые световодные структуры, поверхность которых может контактировать с внешней средой. Известны индикаторы вида жидкости в резервуарах (например, при обнаружении конденсата в заправоч-

ных баках самолетов, основанные на различии показателей преломления контролируемых жидкостей).

Волоконно-оптические датчики имеют большие возможности для реализации самых различных конструктивных решений и в перспективе позволяют создать дешевые, малогабаритные многофункциональные приборы, сопрягаемые с оптическими системами передачи информации.

Рефрактометры. Рефрактометрический метод контроля за последовательной перекачкой нефтепродуктов основан на линейной зависимости показателя преломления смеси от показателя преломления исходных нефтепродуктов и их концентрации. Показатель преломления, как и плотность, являются важными физическими константами при анализе структурно-группового состава нефтепродуктов. С помощью этих констант контролируют чистоту выделенных из нефти продуктов.

Диапазон изменения показателя преломления (n_D^{20}) у бензинов различных марок при температуре 20 °С находится в пределах 1,399 ... 1,43, у дизельных топлив – 1,46 ... 1,48. Следовательно, по значению показателя преломления двухкомпонентной смеси этих нефтепродуктов можно установить их концентрации и границы раздела смеси. В этом случае точность контроля определяется соотношением между точностью измерения n и разницей значений показателей преломления нефтепродуктов. Современные автоматические рефрактометры позволяют находить показатель преломления с точностью до 0,01 ... 0,001 % от измеряемой величины.

Влияние температуры и давления на показатель преломления в основном определяется фактором изменения числа грамм-молекул в единице объема при нагревании или сжатии (т.е. коэффициентами расширения и сжимаемости).

Изменение плотности вещества всегда сопровождается изменением его показателя преломления. Обычно при увели-

чении плотности увеличивается и показатель преломления. Теоретические исследования связи между плотностью вещества и его показателем преломления, а также опытные данные приводят к прямо пропорциональной зависимости функции $f(n)$ от плотности ρ .

Общее выражение для температурных коэффициентов показателей преломления можно представить в виде:

$$\frac{\partial n}{\partial T} \approx \frac{n-1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}.$$

Следовательно, температурный коэффициент показателя преломления пропорционален температурному коэффициенту плотности. В не очень больших интервалах температур температурный коэффициент $\partial n / \partial T$ (как и $\partial \rho / \partial T$) можно считать постоянным. Для органических жидкостей значения $\partial \rho / \partial T$ лежат в узких пределах 0,0004 ... 0,0006/°С и составляют в среднем 0,0005/°С. Линейная экстраполяция показателей n допустима на небольшие разности температур (около 10 ... 20°С). В интервале 40 ... 60°С для органических жидкостей обнаруживается нелинейность зависимости $\partial \rho / \partial T$ от температуры. Точные пересчеты n в широких температурных интервалах проводят по эмпирическим формулам вида:

$$n^T = n^0 + at + aT^2 \dots$$

Ввиду большого температурного коэффициента показателя преломления органических жидкостей необходима их температурная стабилизация.

Для непрерывной автоматической регистрации показателей преломления чаще всего используют методы: дифференциальный гониометрический, полного внутреннего отражения и фотометрический.

По принципу измерений автоматические проточные рефрактометры подразделяются на приборы прямого и компенсационного отсчетов (рис. 8.35). В первых изменение состояния светового потока

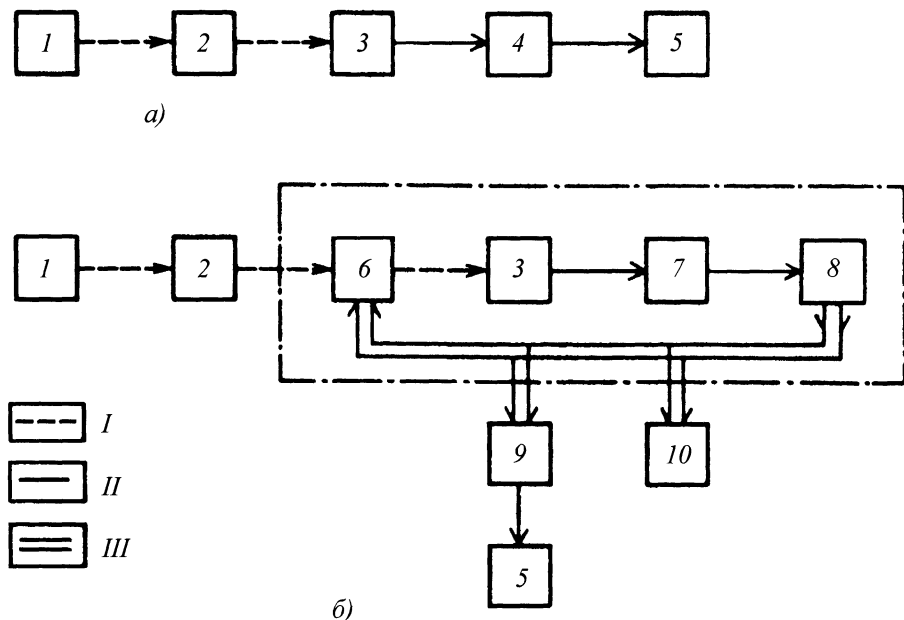


Рис. 8.35. Структурная схема автоматических рефрактометров прямого (а) и компенсационного (б) отсчета:

1 – излучатель; 2 – кювета; 3 – фотоприемник; 4 – преобразователь; 5 – регистрирующий прибор; 6 – компенсатор; 7 – фазочувствительный усилитель; 8 – двигатель; 9 – реохорд; 10 – шкала; I – оптические связи; II – электрические связи; III – механические связи

после прохождения рефрактометрической кюветы (изменение его направления, интенсивности или разности хода) посредством фотоприемника преобразуется в электрический сигнал, амплитуда или фаза которого характеризует значение показателя преломления. После соответствующего преобразования (усиление, определение фазы) сигнал регистрируется вторичным прибором или подается на цифропечать. Недостаток рефрактометров прямого отсчета – необходимость обеспечения стабильности работы излучателя, фотоприемника и электрической схемы.

В рефрактометрах компенсационного типа электрический сигнал фотоприемников автоматически обрабатывается до нулевого значения с помощью электромеханической следящей системы и компенсатора, значение перемещения которого пропорционально измеряемому n . Ком-

пенсация обычно осуществляется в оптическом канале, иногда она производится и в электрической схеме.

К проточным кюветам автоматических рефрактометров предъявляются особые требования, вызванные необходимостью их непрерывной работы в неагрессивных и агрессивных средах под давлением. Кюветы изготовляют из химически стойких материалов (специальных сплавов, тефлона, графита) и снабжают приспособлениями для эффективного выравнивания температур и давлений, предотвращения скопления пузырьков газов, осадков и образования налетов на стеклах кювет.

Автоматические дифференциальные рефрактометры имеют систему полых призм, заполненных сравниваемыми жидкостями. Различные модели таких рефрактометров отличаются конструкцией кю-

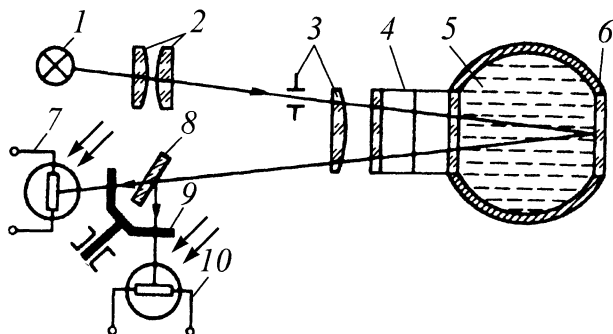


Рис. 8.36. Принципиальная схема рефрактометра РАН-62В:

1 – усилитель; 2 – конденсор; 3 – коллиматор; 4 – кювета с эталонной жидкостью; 5 – контролируемая жидкость; 6 – автоколлимационное зеркало; 7, 10 – фоторезисторы; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – обтюратор

вет, способами регистрации отклонения лучей или осуществления компенсации, а также способами изменения диапазона измерения.

Источником света обычно служит вольфрамовая лампа накаливания со светофильтром, поскольку сравниваемые среды имеют близкие показатели преломления.

В схемах дифференциальных рефрактометров в большинстве случаев используют усилители переменного тока, в которых почти отсутствует дрейф нуля. Знак Δn определяют с помощью синхронного детектора, в котором осуществляется сравнение фазы выпрямленного рабочего сигнала с фазой опорного сигнала той же частоты, генерируемого обычно с помощью модулятора. Выходной сигнал дифференциальных рефрактометров усиливают по мощности и с помощью двигателя проводят управление работой компенсатора. Для компенсации применяют зеркала, плоскопараллельные пластины, наклоняемые по отношению к световому потоку, или линзовые, клиновые компенсаторы.

Разработан автоматический дифференциальный рефрактометр, предназначенный для непрерывного измерения разности показателей преломления Δn жидкостей. Рефрактометр можно применять

для контроля и регулирования технологических процессов в нефтеперерабатывающей, нефтехимической промышленности и в трубопроводном транспорте. Прибор снабжен кюветой с преломляющим углом 120° и множительным механизмом, связанным с линзовым компенсатором, обеспечивающим несколько фиксированных диапазонов измерения без смены кюветы. Кювета вынесена из общего взрывозащищенного корпуса рефрактометра, что упрощает ее обслуживание в процессе эксплуатации (осмотр и очистку); имеется также вспомогательная оптическая система для наблюдения за состоянием окон кюветы во время работы. Кювета снабжена сильфоном для эффективного выравнивания давления и температуры в отсеках. Помехи от газовых включений устраняются особым расположением штуцеров и специальными обводными каналами.

Диапазон измерения Δn рефрактометра $\pm(5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-2})$ разбит на пять поддиапазонов.

Примером промышленного автоматического дифференциального рефрактометра, основанного на фазометрическом способе регистрации отклонения светового потока, является РАН-62В (рис. 8.36). Это прибор погружного типа, монтируемый непосредственно на трубопроводе или емкости без пробоотборных устройств.

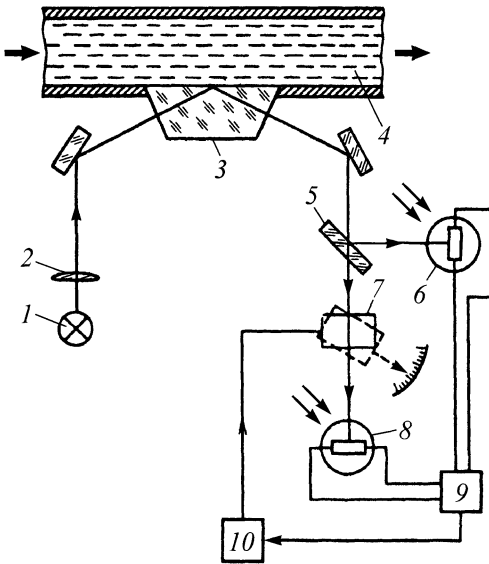


Рис. 8.37. Принципиальная схема рефрактометра:

- 1 – излучатель; 2 – конденсор;
 3 – измерительный элемент (призма);
 4 – контролируемая жидкость; 5 – полупрозрачное зеркало; 6, 8 – фоторезисторы;
 7 – компенсационная пластина; 9 – усилитель;
 10 – индикатор фотоэлектрического сигнала

Пространство между автоколлимационным зеркалом 6 и кюветой 4 с образцовой жидкостью выполняет функцию проточной полости кюветы.

Автоматические рефрактометры полного внутреннего отражения и фотометрического типов особенно удобны для контроля за поглощающими средами. Их измерительные элементы (призмы) образуют стенку проточной кюветы или же устанавливаются непосредственно в трубопроводе или емкости так, что рабочая грань призмы омывается протекающей анализируемой жидкостью.

Освещается измерительный элемент (призма) монохроматическим светом ввиду значительной разницы показателей преломления призмы и жидкости.

Существенное различие температурных коэффициентов показателей преломления призмы и жидкости может привести к появлению температурной погрешности

при отклонении температуры от номинального значения. Для уменьшения погрешности в конструкциях этих рефрактометров предусматриваются различные термокомпенсационные устройства. В простейшем случае это термистор, устанавливаемый в проточной жидкости. Его сигнал, пропорциональный изменению температуры, корректирует показания электрической схемы прибора или перемещает компенсатор. Для повышения метрологической надежности рефрактометров в их конструкциях часто используют двухканальные схемы измерения, особенно в рефрактометрах фотометрического типа.

Фотоэлектрическая регистрация предельного угла в автоматических рефрактометрах полного внутреннего отражения чаще всего производится по границе светотени и реже – фотометрическим или поляризационным способом, причем в приборах со следящей системой используют какой-либо из описанных выше компенсаторов, применяемых в автоматических дифференциальных рефрактометрах гониометрического типа.

В автоматических рефрактометрах фотометрического типа обычно используют схему прямых измерений в одно- или двухканальном варианте. Конструкция фотометрического рефрактометра проста и надежна благодаря отсутствию сложной электромеханической следящей системы. С помощью фотометрических рефрактометров можно измерять показатели преломления поглощающих жидкостей.

Схема автоматического рефрактометра полного внутреннего отражения показана на рис. 8.37. Он монтируется прямо на трубопроводе так, что измерительная призма образует часть его стенки и беспрепятственно омывается протекающим продуктом. Свет от излучателя 1 после прохождения конденсора 2 сходящимся пучком направляется на измерительный призматический элемент 3, рабочая поверхность которого находится в контакте с контролируемым продуктом 4. Фотоэлек-

трическая схема регистрации положения границы света и тени построена с использованием двух сернисто-кадмиевых фоторезисторов δ и δ , на которые направляется свет. На один фотоприемник δ проецируется граница света и тени, а на другой δ – полностью освещенная зона поля зрения; при этом чувствительный слой фоторезистора δ частично диафрагмирован для выравнивания световых потоков. Фоторезисторы δ и δ включены в электрическую мостовую схему 9, на выходе которой имеется индикатор разностного фотоэлектрического сигнала 10. Этот сигнал управляет с помощью следящей системы компенсационной пластиной 7, связанной со шкалой.

Смещение границы света и тени, обусловленное изменением показателя преломления, приводит к изменению сигнала фоторезистора δ при постоянном сигнале фоторезистора δ . По разностному фотоэлектрическому сигналу проводится наклон пластины 7, приводящий к возвращению границы света и тени в исходное положение. При этом следящая система приходит в согласованное положение, а наклон пластины пропорционален изменению показателя преломления.

Использование в рефрактометре сернисто-кадмиевых фоторезисторов с узким спектральным диапазоном чувствительности вблизи длины волны 0,615 мкм позволяет обойтись без специального светофильтра. В целях повышения надежности рефрактометра, при его непрерывной работе на потоке, измерительный элемент изготовлен из твердого и химически стойкого кристалла шпинели и предусмотрена автоматическая струйная очистка его рабочей поверхности. Для исключения температурной погрешности в прибор встроена электронная система температурной коррекции. Конструктивно прибор выполнен в модульном исполнении, что значительно упрощает его монтаж и наладку на трубопроводе.

Фотометрический метод измерения Δn реализован в автоматическом рефрак-

тометре на базе двухканальной оптической схемы. Световой поток от излучателя после прохождения линзы и светофильтра разделяется на два параллельных световых потока, модулированных в противофазе обтюратором. Световые потоки направляются на измерительные элементы, один из которых находится в контакте с образцовой средой, другой – с контролируемой средой. С выхода измерительных элементов световые потоки с помощью линзы фокусируются на фотоприемник. Разность интенсивностей отраженных световых потоков измерительного и сравнительного каналов, регистрируемых фотоприемником, служит мерой измеряемой величины Δn .

Повышения селективности контроля за составом и свойствами продуктов можно добиться путем измерения двух оптических характеристик продукта – показателя преломления n и показателя поглощения α . Для определения этих величин удобно использовать методы отражательной рефрактометрии с применением электронных вычислительных машин.

Каждый из методов и устройств контроля за последовательной перекачкой нефтепродуктов, рассмотренных выше, не может претендовать на универсальность, т.е. охватить контролем всю номенклатуру перекачиваемых сочетаний нефтепродуктов.

Для повышения селективности метода контроля необходимо применять и комбинированные методы, одновременно измеряющие два физических параметра нефтепродуктов (плотность и цвет или диэлектрическую проницаемость и цвет).

Для качественной и количественной оценки органических соединений нефтепродуктов широко используют спектрофотометрические методы анализа в ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра, ими можно идентифицировать близкие по строению вещества даже в тех случаях, когда они трудно различимы по своим физико-химическим свойствам.

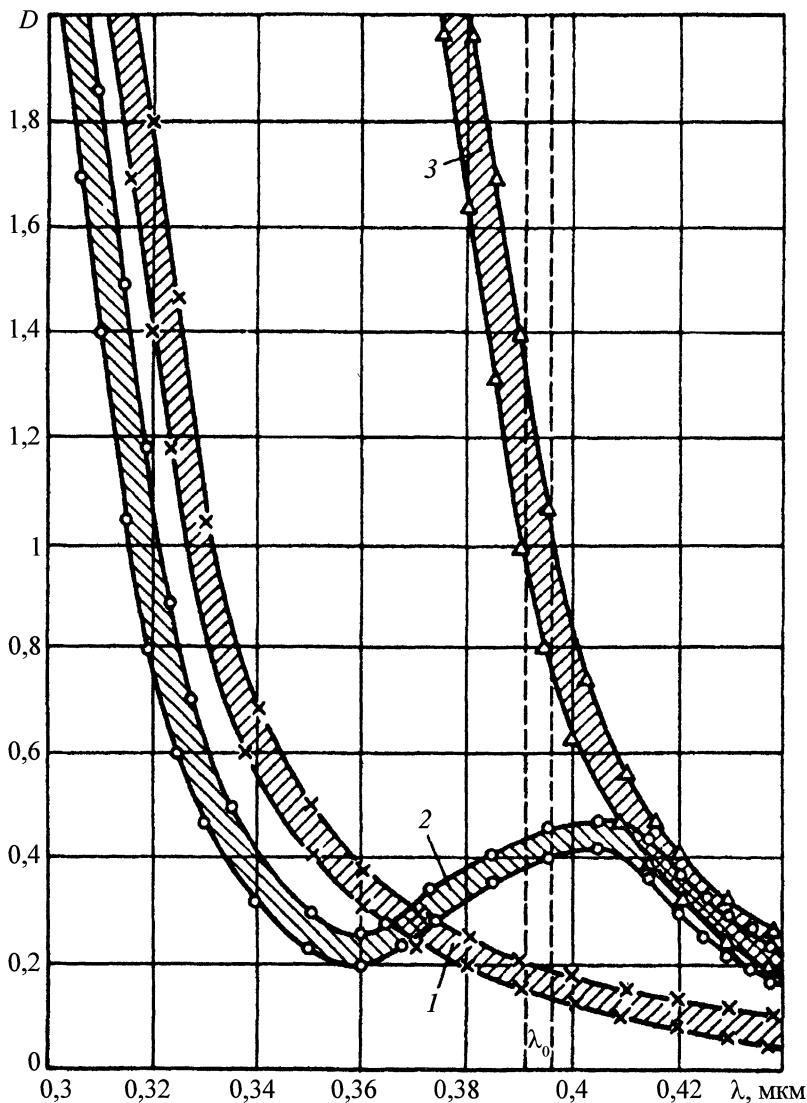


Рис. 8.38. Спектры поглощения нефтепродуктов:

1 – бензин марки А-72н/э; 2 – бензин марки А-76э; 3 – дизельное топливо ДТ-40"Л"

Задачей количественного спектрофотометрического метода анализа является определение содержания некоторого компонента в смеси двух или нескольких веществ. Анализ наиболее прост, если существует полоса поглощения электромагнитного излучения определяемого компонента, не перекрывающаяся полосами остальных

компонентов смеси. В этом случае глубина поглощения коррелируется с концентрацией вещества. Связь между поглощением оптического излучения и концентрацией определяется законом Ламберта–Бера.

Сопоставляя возможности ИК- и УФ-методов определения нефтепродуктов по

их углеводородному составу, предпочтение следует отдать УФ-методу, так как непредельные и ароматические углеводороды хорошо идентифицируются в области спектра 0,25 ... 0,4 мкм. Автомобильные бензины могут содержать в групповом составе в среднем до 20 % ароматических углеводородов, которые, в основном, состоят из гомологов бензола и его алкилпроизводных. Дизельные топлива содержат до 40 % ароматических углеводородов, преобладающей частью которых являются моно- и полициклические углеводороды.

Бензины и дизельные топлива можно четко различать по их оптической плотности в диапазоне 0,32 ... 0,4 мкм, т.е. в длинноволновой области УФ-спектра. Этот результат важен с практической точки зрения, так как позволяет избежать разбавления анализируемых нефтепродуктов, применить в приборе технологически удобные размеры проточных кювет и серийно выпускаемые источники излучения и фотоприемники.

На рис. 8.38 приведены спектры поглощения ряда образцов бензинов марок А-72н/э, А-76э и дизельного топлива ДТ-40"Л". Измерения оптической плотности образцов проводили при толщине поглощающего слоя образца $l = 10$ мм.

Поглощение излучения бензинами и дизельными топливами в диапазоне 0,3 ... 0,4 мкм обусловлено суммарным поглощением "средней" и "тяжелой" частей ароматических углеводородов этих нефтепродуктов.

Бензины марок А-72н/э, А-76э и дизельное топливо ДТ-40"Л" существенно различаются по оптической плотности D в диапазоне длин волн 0,38 ... 0,4 мкм. Однако значения D бензинов и дизельного топлива имеют определенные колебания для нефтепродукта одной и той же марки, зависящие от флуктуации состава ароматических углеводородов в нефтепродукте. Изменение содержания ароматических углеводородов в нефтепродукте оценива-

ется как изменение "сорта" сырья (нефти различных месторождений) и особенностей процесса изготовления нефтепродукта.

Обоснование возможности реализации спектрофотометрического метода (т.е. определение диапазонов изменения D у нефтепродуктов и выяснение степени их перекрытия для нефтепродуктов различных марок) можно сделать только на основе большого массива экспериментальных данных исследования всей номенклатуры нефтепродуктов, перекачиваемых по нефтепродуктопроводам.

При исследовании нефтепродуктопровода в летние и зимние периоды было установлено, что основная часть колебаний D (70 – 80 % диапазона) для одного и того же нефтепродукта связана с сезонностью его изготовления (например, оптическая плотность бензинов, перекачиваемых летом, была выше, чем зимой).

Полученные экспериментальные данные о значениях D бензинов марок А-72н/э, А-76э, дизельных топлив ДТ-40 и ДТ-ТУ позволили установить достоверные границы диапазонов измерения по оптической плотности (рис. 8.39) для пар бензин–бензин (0,025 ... 0,43 D), дизельное топливо–дизельное топливо (0,775 ... 1,155 D) и бензин–дизельное топливо (0,025 ... 1,155 D).

При применении спектрофотометрического датчика на технологических потоках необходимо учитывать, как реально влияют на результаты измерений дестабилизирующие факторы. Под последними понимаются факторы внешней среды (колебания температуры, давления, влажности), в которой датчик находится при эксплуатации, и факторы, определяющие состояние самого анализируемого нефтепродукта (колебания расхода, давления, температуры, концентрации и фракционного состава загрязнений нефтепродукта).

Загрязнения, находясь в анализируемом нефтепродукте во взвешенном состоянии, вызывают ослабление светового

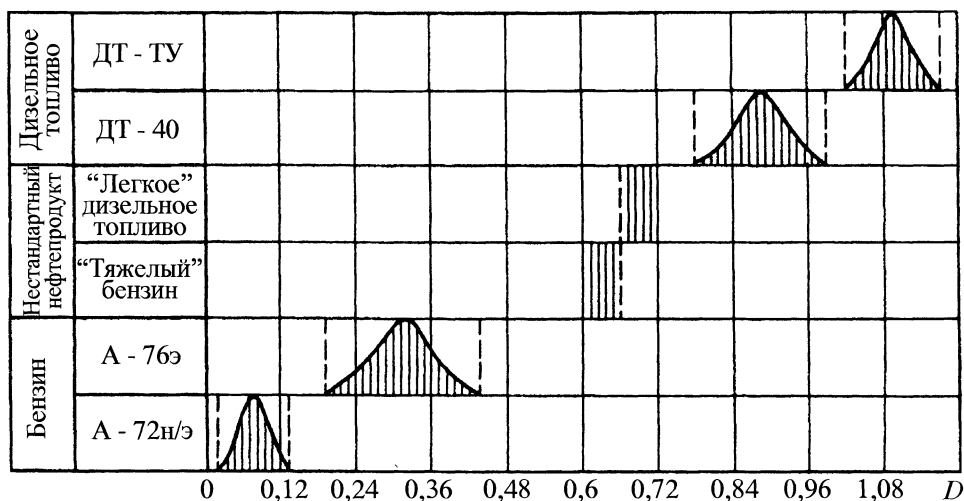


Рис. 8.39. Диаграмма распределения нефтепродуктов по оптической плотности при $\lambda_{\max} = 0,39 \pm 0,005$ мкм и $l = 20$ мм

потока вследствие поглощения и рассеяния излучения взвешенными частицами.

При применении спектрофотометрического датчика на магистральном нефтепродуктопроводе его необходимо защитить от влияния загрязнений.

Как показал анализ эксплуатации спектрофотометрических датчиков, на магистральных нефтепродуктопроводах такие дестабилизирующие факторы, как изменение температуры у нефтепродуктов, колебания расхода, давления анализируемых нефтепродуктов, окрашивание бензинов антрахиноновыми красителями, не влияют на процесс измерения оптической плотности.

Определение концентрации нефтепродуктов (C_A , C_B) в смеси, с учетом изменяющихся во времени измеряемых оптических плотностей (D_A , D_B) двух последовательно перекачиваемых нефтепродуктов, проводят с учетом факта, что зависимость оптической плотности смеси нефтепродуктов от концентрации нефтепродуктов подчиняется условию аддитивности.

В фотометрах, реализующих этот метод, используют двухлучевую двухволно-

вую схему с электрической компенсацией.

Специфика применения двухволновой методики для загрязненных нефтепродуктов состоит в том, что влияние взвешенных частиц компенсируется путем измерения оптической плотности нефтепродукта на двух спектральных линиях λ_n (измерительный канал) и λ_c (сравнительный канал). Отношение оптических плотностей D_n и D_c является мерой концентрации анализируемого нефтепродукта. С этой целью λ_c выбрана так, чтобы в этой области спектра присутствовало поглощение только от частиц загрязнений, а бензины и дизельные топлива на λ_c были прозрачны.

Метод индикации органическими люминофорами и красителями. Люминесцентные индикаторы – вещества, способные люминесцировать или тушить люминесценцию при изменении концентрации ионов водорода в растворе. По характеру свечения индикаторы делятся на флуоресцентные и хемилюминесцентные. Для возбуждения флуоресценции применяют ультрафиолетовые источники излучения (ртутно-кварцевые лампы) с УФ-ин-

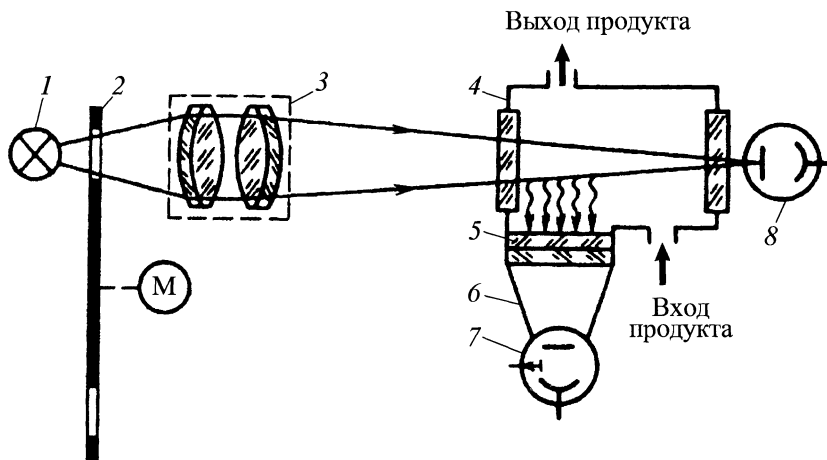


Рис. 8.40. Оптическая схема флуориметрического детектора:

- 1 – источник УФ-излучения; 2 – модулятор; 3 – коллиматор; 4 – рабочая кювета;
5 – интерференционный светофильтр; 6 – фокализатор; 7 – фотоумножитель;
8 – фотоэлемент, чувствительный к УФ-излучению

терференционными светофильтрами. Хемилюминесцентные индикаторы не требуют внешнего источника возбуждения. Появление, тушение или изменение цвета свечения устанавливают визуально или с помощью фотоэлектрических приборов. В отличие от цветных индикаторов (жирорастворимые красители) люминесцентные позволяют проводить контроль в мутных и окрашенных средах.

В качестве люминесцентных индикаторов в процессах последовательной перекачки нефтепродуктов применяют органические люминофоры, которые, в отличие от неорганических, могут светиться не только в твердом, но и в жидком состоянии, так как их свечение обусловлено химической структурой молекул. К ним относятся полициклические ароматические углеводороды, азото-кислородосодержащие и гетероциклические соединения.

Исследования, проведенные на нефтепродуктопроводах, показали, что органические люминофоры не изменяют цвет нефтепродуктов, не вступают в химические реакции с углеводородами, не оседают на стенках нефтепродуктопровода.

Люминесцентный метод контроля основан на зависимости интенсивности люминесценции от количества люминесцирующего вещества. Флюоресцирующее излучение измеряют под углом к падающему излучению для того, чтобы избежать помех со стороны возбуждающего светового потока. Выпускают ряд приспособлений для измерения интенсивности флюоресценции различных жидкостей, при помощи которых спектрофотометрический прибор может быть превращен во флуориметр.

Рассмотрим принцип работы флуориметрического детектора. Достоинствами прибора являются высокая чувствительность ($1 \cdot 10^{-7} \dots 2,5 \cdot 10^{-11}$ г/мл), использование источника излучения с высоким энергетическим выходом, модульная конструкция, тестовый самоконтроль и встроенная система калибровки прибора. В автоматическом флуориметрическом детекторе (рис. 8.40) ультрафиолетовый источник излучения 1 возбуждает молекулы анализируемой пробы, находящейся в проточной кювете 4. Дезактивация этих молекул сопровождается флуоресцентным

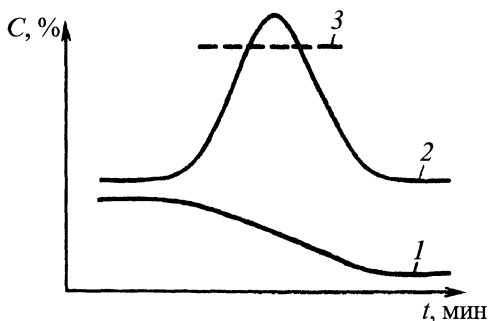


Рис. 8.41. Детектирование зоны смеси нефтепродуктов с помощью флуориметрического детектора:

1 – изменение плотности; 2 – кривая, соответствующая концентрации индикатора; 3 – заданный уровень флуоресценции, при котором происходит сигнализация

излучением. Результат измерения флуоресцентного излучения под углом 90° сравнивают с результатом прямого измерения излучения от источника. Отношение этих двух значений пропорционально содержанию люминофора в контролируемой среде.

Автоматическая система контроля за последовательной перекачкой нефтепродуктов с применением флуоресцентных индикаторов состоит из устройства ввода в нефтепродуктопровод флуоресцентного красителя и аппаратуры контроля, а также из флуориметрического детектора и поверочной установки.

Детектор постоянно контролирует уровень флуоресценции проходящего продукта в трубопроводе. Выход детектора подключен к регистрирующему прибору, который имеет сигнальное устройство, настраиваемое во всем диапазоне измерения интенсивности флуоресценции. На рис. 8.41 приведены кривые изменения уровня флуоресценции, зарегистрированные детектором. Когда уровень флуоресценции сравняется с заранее заданным его значением, на начальный пункт нефтепродуктопровода выдаются сигналы о проведенном обнаружении границ раздела. Для проверки работоспособности детектора за 1 ч до ожидаемого подхода смеси по ко-

манде из начального пункта во всасывающую линию циркуляционного насоса вводится небольшое количество слабого раствора люминофора в керосине. Сигналы о границе раздела поверочной имитируемой смеси также передаются и на начальный пункт.

Определенные трудности имелись при контроле за дизельным и котельным топливом, так как оно имело значительный уровень естественной флуоресценции (хемилюминесценции) в той же спектральной области, что и применяемый люминофор. При использовании широкополосных светофильтров уровень естественного флуоресцентного излучения этих нефтепродуктов был одного порядка с флуоресцентным излучением люминофора. Для уменьшения чувствительности детектора к естественной флуоресценции использовали специальные интерференционные светофильтры и увеличивали концентрацию люминофора. Применение естественной флуоресценции для контроля за последовательной перекачкой затруднено, так как уровень естественной флуоресценции различных марок нефтепродуктов трудно предсказать.

Сравнение спектров бензинов и красителей показало, что для подкрашивания бензинов целесообразно использовать зеленый и фиолетовый красители. Причем зеленый менее предпочтителен, так как его максимум вблизи $\lambda = 0,625 \text{ мкм}$ является слабым. Наиболее подходящим оказался фиолетовый краситель, максимум поглощения которого достаточно симметричен и лежит в области полной прозрачности всех бензинов. Это обстоятельство имеет существенное значение при работе с фотоэлектроколориметрами, в которых для выделения спектральной области используют широкополосные светофильтры из цветного стекла. Оптическая плотность раствора фиолетового красителя линейно зависит от его концентрации.

Анализаторы определения свинца. Основными антидетонаторами для бензинов служат тетраэтил-свинец (ТЭС) и в

последние годы тетраметилсвинец (ТМС), а также их смеси и некоторые другие алкилсвинцовые соединения. Промышленное применение, но пока в незначительных масштабах, начинают получать малотоксичные антидетонаторы на основе марганца. Методы определения антидетонаторов касаются, главным образом, тетраэтилсвинца, который используют уже несколько десятилетий. Таких методов предложено много, существуют и стандартизованные методы. В последнее время за рубежом, в связи с необходимостью определения малых количеств ТЭС и ТМС в автомобильных бензинах новых марок, для которых нормы на содержание антидетонаторов снижены, разрабатывают и стандартизируют новые методы.

В качестве стандартного служит метод ГОСТ 13210–72, который применяют к автомобильным и авиационным бензинам. Он основан на комплексонометрическом оттитровывании свинца, полученного разложением алкилов свинца соляной кислотой. Метод трудоемок и обладает удовлетворительной точностью расхождения параллельных определений, согласно стандарту, не превышают 0,01 г/кг при содержании свинца в бензине до 0,5 г/кг и 0,02 г/кг при более высоком содержании свинца. Кроме того, этот метод не позволяет определять в бензине микропримеси свинца.

Для определения малых количеств свинца в бензинах в США имеются стандартизованные методы ASTM 3348, ASTM 3116, ASTM 1368 (колориметрические), ASTM 3229, ASTM 2599 (рентгенометрические), а также метод ASTM 3237 (спектрофотометрический атомно-абсорбционный).

Колориметрический метод ASTM 3348 предназначен для анализа в полевых условиях. Он пригоден для определения алкилов свинца всех типов в пределах концентраций свинца 2,64 ... 26,6 мг/л. При анализе обнаруживается свинец, присутствующий в виде других органических

и неорганических соединений. Окрашенные комплексы свинца колориметрируют при $\lambda = 0,49$ мкм, затем определяют содержание свинца по предварительно построенной градуировочной кривой. Градуировочную кривую строят по растворам алкилов свинца в неэтилированном бензине для различных концентраций (не менее четырех) в определяемых пределах.

Метод ASTM 3237 предназначен для определения алкилсвинцовых антидетонаторов в бензинах при содержании свинца 2,5 ... 25 мг/л. Содержания свинца в образце находят путем атомно-абсорбционной пламенной спектроскопии при $\lambda = 0,283$ мкм, применяя для сравнения стандартные образцы, приготовленные на основе хлорида свинца. Метод пригоден для определения алкилсвинцового антидетонатора любого типа.

Аналогичный метод определения содержания свинца в бензинах применяют на отечественных магистральных нефтепродуктопроводах.

Методика основана на разбавлении испытуемых бензинов этиловым спиртом до концентрации 2 ... 30 мг/кг (в 50 или 100 раз), а соединения свинца приводят к единой форме путем обработки анализируемых проб и эталонов спиртовым раствором йода. Содержание свинца в приготовленных таким образом пробах определяют атомно-абсорбционным спектральным методом на $\lambda = 0,283$ мкм с использованием воздушно-ацетиленового пламени. По калибровочному графику устанавливают концентрацию свинца в разбавленных пробах бензинов. Затем, умножая полученные результаты на степень разбавления проб, подсчитывают концентрацию свинца в исходных бензинах. Диапазон определяемых концентраций свинца 0,1 ... 3 г/кг, предел обнаружения 0,02 г/кг.

Развитие приборов для атомно-абсорбционного анализа (AAA) идет за счет автоматизации с помощью микропроцессорной техники, ставшей частью многих оптических аналитических прибо-

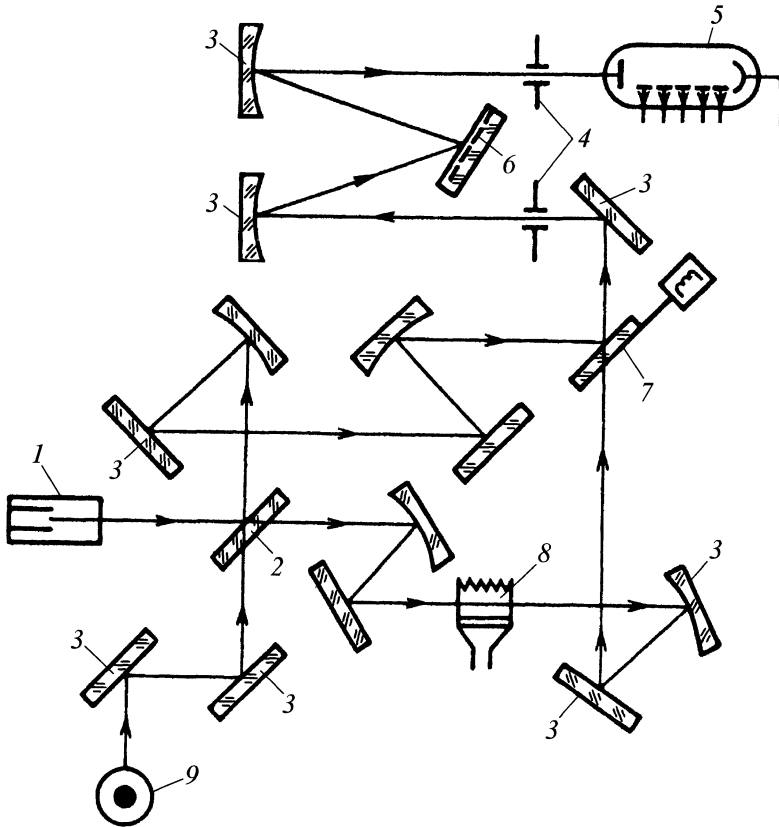


Рис. 8.42. Оптическая схема автоматического атомно-абсорбционного спектрофотометра:

1 – лампа с полым катодом; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – зеркала; 4 – щели монохроматора; 5 – фотоумножитель; 6 – дифракционная решетка; 7 – модулятор-переключатель световых потоков; 8 – атомизатор; 9 – дейтериевая лампа

ров, а также за счет использования новых схем, элементов, методов обработки данных.

Основные отличия последних моделей отечественных и зарубежных атомно-абсорбционных спектрофотометров связаны с автоматизацией, развитием пламенных и электротермических атомизаторов (ЭТА) и с улучшением методов компенсации неселективных помех. Несмотря на быстрое развитие ЭТА, пламенные методы ААА сохраняют свое значение и широко применяются. Это объясняется тем, что ЭТА целесообразно использовать при решении задач, в которых нужны или

очень низкие пределы обнаружения элементов, или имеются жесткие ограничения массы либо объема анализируемой пробы.

Пламенные методы отличаются простотой метода и аппаратуры, большей производительностью, лучшей воспроизводимостью, хотя по последнему параметру ЭТА приблизилась к пламенной.

На рис. 8.42 приведена оптическая схема атомно-абсорбционного спектрофотометра. Спектрофотометр позволяет автоматически проводить анализ до 12 элементов с пламенной и ЭТА атомизацией. Управление прибором, сменой проб и атомизаторами осуществляется мини-

ЭВМ, вынесенной в отдельный блок. На магнитных дисках хранится до 30 программ с возможностью выбора определяемых элементов.

Анализаторы для определения наличия воды и механических примесей. В настоящее время требования к чистоте нефтепродуктов непрерывно повышаются. Во многих отечественных и зарубежных спецификациях на реактивные топлива уже установлены нормы на содержание механических примесей и воды при отгрузке и у потребителя.

В качестве загрязнений рассматриваются механические примеси, вода, микроорганизмы и поверхностно-активные вещества (ПАВ). Показатель "содержание механических примесей и воды" очень важен, так как определяет надежность работы двигателей.

Для контроля чистоты нефтепродуктов имеется ряд стандартных методов и большое число исследовательских.

Основной принцип наиболее распространенных методов определения содержания механических примесей – определение привеса фильтра после пропускания через него некоторого количества нефтепродукта. Этот метод стандартизован в различных странах: ГОСТ 10577–78, ASTM D 2276 (США), IP 216 (Великобритания).

Методы определения наличия воды в нефтепродуктах можно разделить на химические и физические. Химические методы основаны на добавлении в нефтепродукт веществ, дающих при взаимодействии с водой окраску. Такими веществами являются, например, некоторые водорастворимые соли, образующие с водой щелочную или кислую среду, окрашивающую индикатор. Физические методы основаны на косвенном определении содержания воды без изменения ее молекулярного состояния. Для этого применяют инструментальные методы анализа – оптические, электрические, хроматографические, дистилляционные и др.

Химические методы делят на качественные и количественные. Для количественного определения воды в нефтепродуктах чаще всего используют метод Дина и Старка ГОСТ 2477–65, ASTM D 95 (США), IP 74 (Великобритания). Этот метод был положен в основу объединенного международного стандарта ISO. Метод применяют, главным образом, для определения относительно больших концентраций воды в нефтепродуктах. Точность метода характеризуется следующими данными. При содержании воды: до 1 мл сходимость 0,1 мл, воспроизводимость 0,2 мл; 1,1 ... 25 мл сходимость 0,1 мл или $\pm 2\%$, воспроизводимость 0,2 мл или $\pm 10\%$.

Для определения небольших количеств воды в нефтепродуктах за рубежом широко используют метод Фишера (титрометрический), а в отечественной практике – гидридкальциевый метод (калориметрический). Метод Фишера служит для определения суммарного содержания воды в нефтепродуктах в количестве 0,005 ... 0,1 % по массе и характеризуется высокой точностью (0,001 %). Погрешность гидридкальциевого метода при содержании в нефтепродукте воды менее 0,005 % по массе составляет $\pm 20\%$, а при содержании более 0,025 % по массе – 5 %. Продолжительность анализа около 1 ч.

В последние годы все шире применяют автоматические экспресс-анализаторы, основанные на химических методах контроля за водой и механическими примесями в нефтепродуктах. Известно около 40 моделей таких приборов. Фирма "Миллипор" (США) разработала портативный прибор "Hydroscan" для определения свободной воды в реактивном топливе. Прибор представляет пористый диск, пропитанный водочувствительным флуоресцирующим красителем. При пропускании через диск нефтепродукта, содержащего свободную воду, цвет красителя в точках контакта каждой капли воды с диском изменяется. При облучении диска ультрафиолетовыми лучами точки начинают яр-

ко светиться. Пропуская через диск определенное количество нефтепродукта и сравнивая его окраску при облучении ультрафиолетовыми лучами с эталонными дисками, в течение нескольких минут можно определить содержание в нефтепродукте свободной воды. Этот метод позволяет обнаружить в нефтепродукте менее 0,0005 % по массе воды.

Физические методы. Для качественного и количественного определения воды и механических примесей в нефтепродуктах применяют и физические методы контроля. Среди количественных методов наиболее распространены диэлькометрические и оптические (ИК-спектроскопия, нефелометрия, фотоколориметрия). Преимуществом физических методов является то, что на их базе, в основном, созданы автоматические проточные анализаторы определения воды и механических примесей в нефтепродуктах.

Оптические методы основаны на том, что при падении потока излучения на эмульсию продукта с примесями обычная картина поглощения излучения искажается рассеиванием на оптических неоднородностях анализируемого объекта. Часть светового потока отражается, часть выходит из эмульсии, рассеиваясь в разных направлениях. Интенсивность излучения в каждой точке рассеянного светового потока зависит от концентрации воды или механических примесей, параметров распределения капель или частиц примесей по размерам, длины волны падающего излучения и оптических свойств контролируемой среды.

Любой из перечисленных эффектов можно использовать для нахождения содержания воды и построения автоматического анализатора.

Среди оптических методов определения содержания воды и механических примесей применяют турбидиметрический и нефелометрический методы. Первый способ измерения концентрации взвешенных частиц в жидкости основан на ослаблении первичного светового потока при

сравнении прозрачности эталонной и анализируемой жидкостей. При втором способе концентрацию взвешенных частиц в жидкости измеряют по интенсивности рассеянного частицами светового потока.

Для контроля содержания свободной воды в нефтепродуктах наиболее распространены турбидиметрический автоматический анализатор модели "Akvascan" фирмы "Бритиш Петролеум" (Великобритания), с помощью которого можно определять концентрацию воды в потоке нефтепродукта в пределах 0 ... 0,004 % по массе, с точностью $\pm 0,0005$ % по массе. В настоящее время эта модель анализатора усовершенствована. В нее дополнительно введена оптическая приставка для определения содержания механических примесей. При этом чувствительность усовершенствованного анализатора "Akvascan" по определению воды повысилась до $\pm 0,0002$ % по массе.

Весьма перспективными являются влагомеры, использующие излучение в ближней ИК-области спектра (1 ... 3 мкм).

Принцип действия анализаторов основан на изменении поглощения эмульсионной водой ИК-излучения в области $\lambda = 1,95$ мкм.

Для исключения влияния рассеяния света на изменения сорта нефти и других нежелательных факторов сравнивается ослабление излучения нефтью в аналитической области $1,95 \pm 0,05$ мкм и эталонных областях. В двухволновых спектральных приборах одна эталонная область – $1,85 \pm 0,05$ мкм, в трехволновых приборах – две эталонные спектральные области: $1,85 \pm 0,05$ мкм и $2,07 \pm 0,04$ мкм.

Все операции проводятся автоматически. Предварительной градуировкой подбирают такой коэффициент преобразования разности логарифмов сигналов в цифровой код, чтобы цифры на табло указывали непосредственно процент содержания воды в образце.

Характерным отличием трехволнового анализатора влагосодержания нефти является независимость показаний от сорта нефти в достаточно широких пределах

его измерения. На результате анализа не сказывается также концентрация соли в пластовой воде и наличие в пробе рассеивающих свет механических включений. Пределы измерения влагосодержания 0 ... 1 %; 0 ... 10 % и 0 ... 30 % по объему, основная приведенная погрешность для диапазона 0 ... 1 % по объему ± 6 %.

Определение содержания смолистых веществ и твердых загрязнений. Содержание смол в настоящее время определяют выпариванием определенного объема топлива при повышенной температуре. Остающийся после выпаривания топлива остаток относят к смолам, неправильно называя их "фактическими". В действительности этим методом определяется сумма смол и осадков, содержащихся в исходном топливе и образующихся в нем при выпаривании. Следует отметить длительность этого стандартного метода.

Содержание смол можно определить по окраске топлива. Для этого используют прибор, который предназначен для определения оптической плотности в видимой области спектра. Можно прямо связать оптическую плотность в видимой области с содержанием смол в топливе. Это было экспериментально проверено. К свежеполученному обессмоленному топливу ТС-1 добавили предварительно выделенные адсорбционным путем смолистые вещества в количестве 2, 4, 8, 12, 20, 26, 36, 56 мг/100 мл и затем измерили оптическую плотность на фотокориметре ФЭК-М с синим фильтром. Эталоном служило исходное топливо. Результаты представлены на рис. 8.43. Между оптической плотностью и содержанием смолистых веществ в топливе существует линейная зависимость.

Таким образом, в процессе хранения или восстановления качества можно контролировать содержание смолистых веществ по оптической плотности, имея соответствующие градуировочные графики или таблицы. Внедрение этого метода позволяет уменьшить время определения и

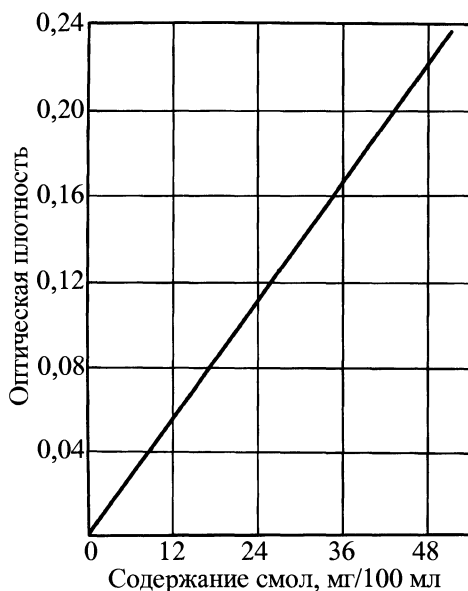


Рис. 8.43. Зависимость между оптической плотностью и содержанием смолистых веществ в топливе ТС-1

получать истинное содержание смол в топливах. На одно определение оптической плотности после выхода на режим прибора необходимо 10 ... 20 с. По сравнению со стандартным методом это дает выигрыш в сотни раз. Кроме того, при определении смол по предлагаемому методу отпадает необходимость в аналитических весах.

Метод определения содержания смол по оптической плотности к искусственно окрашенным нефтепродуктам, например этилированным бензинам, можно применять с учетом соответствующих поправок.

В настоящее время разработан и экспериментально проверен автоматизированный телевизионный анализатор АТА-1, предназначенный для подсчета количества частиц твердых загрязнений жидкостей на мембранных фильтрах в поле зрения телевизионной камеры с разделением их по размерам.

Для устойчивой работы комплекса необходимо, чтобы линейный размер частиц и минимальное расстояние между соседними частицами составляли не менее

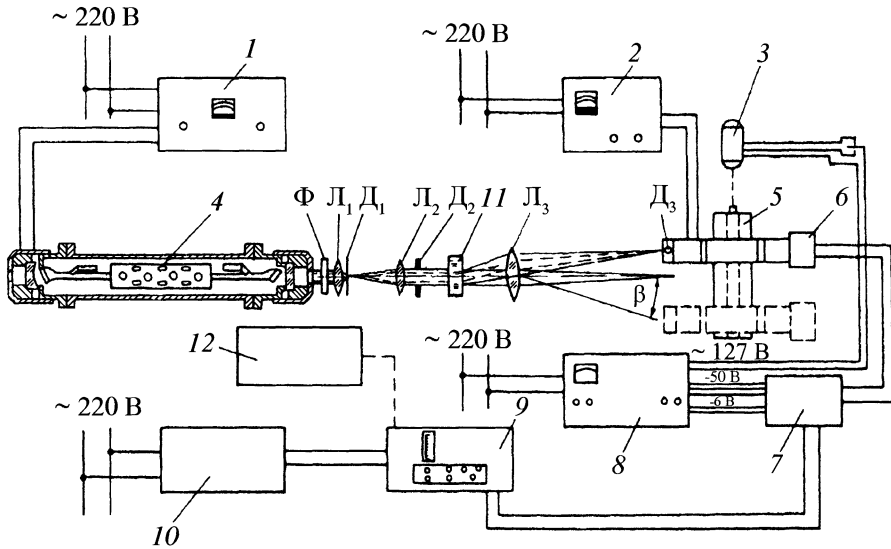


Рис. 8.44. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения дисперсности частиц размером 2 ... 100 мкм в жидких средах:

1 – блок питания оптического квантового генератора; 2 – высоковольтный стабилизированный выпрямитель; 3 – реверсивный электродвигатель; 4 – оптический квантовый генератор; 5 – перемещающее устройство; 6 – фотоэлектронный умножитель; 7 – фотоэлектрический усилитель; 8 – универсальный блок питания; 9 – осциллограф; 10 – блок питания осциллографа; 11 – кювета; 12 – вычислительное устройство; Ф – нейтральный фильтр; Л₁, Л₂, Л₃ – соответственно конденсорная, коллиматорная и приемная линзы; Д₁, Д₂, Д₃ – соответственно точечная, ирисовая и приемная диафрагмы

1 % от линейного размера анализируемого поля зрения; частицы неподвижны и расположены в одной плоскости; неравномерность фона, на котором наблюдаются частицы, составляет не более 5 %; контрастность частиц обеспечивает получение импульсов видеосигнала в любом участке растра размером не менее 50 % максимального перепада напряжения сигнала. В этом случае средняя квадратичная погрешность не превышает 2 % от общего количества частиц в анализируемом поле зрения.

Разрешающая способность автоматизированного телевизионного анализатора может регулироваться изменением кратности увеличения оптической схемы микроскопа в достаточно широких пределах.

Кроме того, разработан метод, который позволяет определять загрязненность,

не разрушая самой гетерогенной системы нефтепродукт–загрязнения. Он основан на рассеянии света под малыми и большими углами и выявляет частицы с размером 0,1 ... 10 мкм.

Экспериментальная установка для определения дисперсности частиц методом светорассеяния на малых углах в жидких средах (рис. 8.44) включает источник света, оптическую систему, кювету и регистрирующую аппаратуру. Источником монохроматического света служит гелий-неоновый лазер, который является генератором непрерывного когерентного излучения с длиной волны 0,6328 мкм и мощностью 10 мВт. Оптическая система установки включает нейтральный светофильтр, конденсорную и коллиматорную линзы, точечную, ирисовую и приемную диафрагмы.

Перепад интенсивностей рассеянного света в интервале значений угла $\beta = 0 \dots 10^\circ$ составляет $I_{\max}/I_{\min} \approx 10^6 \dots 10^5$. Такой диапазон интенсивностей перекрывали оптическим ступенчатым ослабителем. Световой поток, поступающий на фотокатод фотоэлектронного умножителя через нейтральные светофильтры, меняется в узких пределах и не превышает предельных световых нагрузок для фотокатода, поэтому умножитель работает в наиболее легком режиме.

При изменении индикатрисы рассеяния на малых углах использовали прямоугольную кювету с плоскопараллельными стенками. Кювета оборудована механической мешалкой, установленной вне зоны освещенного объема. Приемником рассеянного света является фотоэлектронный умножитель с чувствительностью 0,30 ... 0,82 мкм. Фотоэлектронный умножитель с приемной диафрагмой D_3 смонтирован в стальном корпусе и установлен на перемещающем устройстве, с помощью которого умножитель передвигается в фокальной плоскости линзы L_3 . Вращение винта перемещающего устройства осуществляется реверсивным двигателем. Устройство обеспечивает необходимую скорость развертки по углу β .

Методика проведения измерений света, рассеянного дисперсными системами, и обработки экспериментальных индикатрис заключается в следующем. После юстировки оптики кювету устанавливают на предметном столике между коллиматорной L_2 и приемной L_3 линзами. При этом положение приемной диафрагмы регулируют так, чтобы скомпенсировать призматическую ошибку, вносимую кюветой. Светорассеяние на углах $0 \dots 3^\circ$ измеряют, применяя набор нейтральных светофильтров. Показания на ленте осциллографа, соответствующие этим участкам, считывают с учетом коэффициента ослабления светофильтров.

Общее число частиц в единице освещенного объема нефтепродукта определяют по экспериментально снятым зависимостям интенсивности света, рассеян-

ного под заданным углом от концентрации частиц.

Для проверки метода малых углов исследованы кварцевая пыль и порошки ликоподия и стиракрила с различным фракционным составом. Порошки стиракрила имели следующий фракционный состав (основные фракции), мкм: модель А – 5 ... 10; модель Б – 10 ... 15; модель В – 1 ... 5. В экспериментах использовали плоские и объемные модели. Плоские модели представляли собой кварцевые плоскопараллельные пластинки, на которые наносили монослой частиц. Пластинку предварительно готовили так, чтобы при пропускании света она давала минимальное "нулевое распределение" освещенности. Частицы порошка хорошо удерживались на пластинке электростатическими силами при проведении эксперимента и при последующем микроскопическом анализе. Объемные модели представляли собой суспензии микропорошка в топливе ТС-1. Кварцевую пыль вносили в топливо в количестве 0,01 %.

Результаты, полученные методом малых углов, сравнивали с данными, полученными методом счета под микроскопом, принятыми эталонными.

Порошок ликоподия (размер частиц 29 ± 1 мкм) был использован для оценки разрешающей способности экспериментальной установки. Первый дифракционный максимум расположен в области $1^\circ 52'$, что совпадает с теоретическими данными. Первый дифракционный минимум лежит в области $1^\circ 16'$, что на 6 % отличается от теоретического. Эти данные свидетельствуют о том, что экспериментальная установка дает хорошие результаты при определении размеров частиц монодисперсного порошка. Сопоставление экспериментальных данных показывает хорошую сходимость результатов, полученных двумя независимыми методами – микроскопическим счетом и методом малых углов.

Исследованиями модельных систем, частицы которых имели шарообразную и неправильную формы, установлено, что метод малых углов может быть успешно

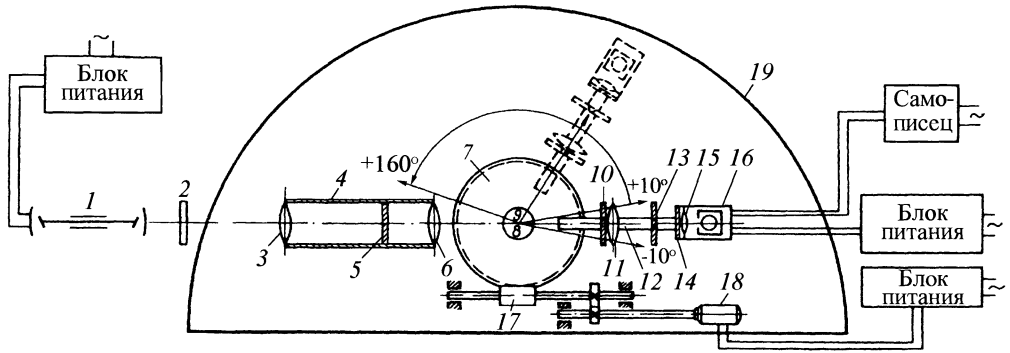


Рис. 8.45. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения размеров (0,1 ... 10 мкм) и количества частиц в жидких средах:

- 1 – лазер; 2 – нейтральный фильтр; 3 – конденсорная линза; 4 – светозащитная трубка; 5, 13 – диафрагма с точечным отверстием; 6 – коллиматорная линза; 7 – вращающаяся платформа; 8 – предметный столик; 9 – положение пробы; 10 – диафрагма; 11 – линза; 12 – Т-образная рейка; 14 – приемная диафрагма; 15 – приемная линза; 16 – фотоэлектронный умножитель; 17 – червяк; 18 – электродвигатель; 19 – светозащитный кожух

применен и для частиц неправильной формы. В этом случае диаметр частицы определяется как сторона квадрата, в который вписывается изображение частицы, проецирующееся в направлении падающего света.

Методом рассеяния света на больших углах можно получить информацию о содержании и распределении частиц по размерам 0,1 ... 10 мкм. Экспериментальная установка (рис. 8.45) включает источник света – лазер, оптическую систему и регистрирующую аппаратуру. Оптическая система состоит из передающей и приемной систем. В передающую систему входят нейтральный светофильтр, конденсорная и коллиматорная линзы, диафрагма с точечным отверстием.

Приемная оптическая система состоит из диафрагмы, приемной линзы, диафрагмы с точечным отверстием, приемной диафрагмы и коллиматорной линзы. Она служит для приема рассеянного света и направления его на катод ФЭУ. Оптическая система обеспечивает равномерное освещение площади фотокатода параллельным пучком рассеянного света, что улучшает стабильность работы приемника

лучистой энергии.

Для изменения угла наблюдения при измерении индикатрисы рассеяния приемная оптическая система и приемник лучистой энергии перемещаются в горизонтальной плоскости с помощью установки, которая состоит из поворотного стола (платформы), многоступенчатого шестеренного редуктора и электродвигателя. В центре вращения платформы неподвижно укреплен предметный столик, на котором размещается кювета. Узел крепления столика обеспечивает его неподвижность при вращении платформы с заданной постоянной угловой скоростью.

Цилиндрическая кювета значительно уменьшает отражение падающего и рассеянного пучков света и не нарушает их параллельности.

После юстировки установки и съемки тарировочной индикатрисы определяют экспериментальные индикатрисы со скоростью 0,1 ... 0,2 °/с в области 5 ... 165°. Для получения истинной индикатрисы из экспериментальной вычитают индикатрису, снятую без образца. В полученную разностную кривую вносят поправку на значение рассеивающего объема. Значение

поправки зависит от угла рассеяния, радиуса кюветы и ширины светового пучка. Исправленная разностная кривая $\Delta I(\beta) = [I(\beta) - I_0(\beta)] \varphi(\beta)$ обрабатывается по методу статистической регуляризации.

8.3.2. Оптический контроль эпоксидных покрытий труб

При изготовлении нефтегазовых трубопроводов контролю толщины подлежат грунтовочные слои толщиной 50 ... 100 мкм из эпоксидных красок под полиэтиленовое покрытие, тонкослойные эпоксидные покрытия толщиной 50 ... 800 мкм, полиэтиленовые покрытия (в целом) толщиной 2 ... 5 мм и др.

Выбор бесконтактных методов определяется тем, что покрытие в этих зонах является неотвержденным и механический контакт с его поверхностью приводит к нарушению целостности. Дополнительные ограничения вносят и другие особенности объекта контроля: геометрические параметры поверхности и температура изделия, диэлектрические свойства и диапазон измеряемых толщин покрытия и т.д., а также условия измерения: температура окружающей среды в зоне нанесения, изменение положения контролируемой поверхности относительно прибора контроля. Например, контроль толщины эпоксидного покрытия необходимо осуществлять после нанесения его на волнистую поверхность трубы диаметром 530 ... 1420 мм с параметром шероховатости $Ra = 5 \dots 20$ мкм ($Rmax = 30 \dots 140$ мкм) при температуре трубы 150 ... 250° С. Контроль должен производиться при винтовом перемещении трубы с осевой скоростью 0,5 ... 2 м/мин и вращении с окружной скоростью до 50 м/мин. При этом смещение поверхности в зоне контроля в радиальном направлении составляет до ± 20 мм, а углы смещения – до $\pm 10^\circ$.

Известные магнитные, вихретоковые, емкостные и другие контактные методы позволяют осуществить лишь выборочный контроль толщины покрытия на трубах.

Кроме того, измерения проводятся после отверждения покрытия, которое длится от 5 ... 10 мин до нескольких часов. В связи с этим нарушения технологических режимов нанесения покрытия выявляются со значительным опозданием, что приводит к отбраковке части труб, изготовленных за время отверждения.

Нецелесообразно использование и ряда бесконтактных методов. В частности, пневматический метод и метод обратного бета-рассеяния мало пригодны, поскольку требуют поддержания стабильного зазора между контролируемой поверхностью и датчиком. Другие методы контроля с использованием ионизирующих излучений требуют применения дорогого и сложного оборудования.

Такие задачи целесообразно решать с помощью радиоволновых, тепловых или оптических методов, основанных на использовании особенностей взаимодействия излучения этих диапазонов с полимерными покрытиями.

Использованию СВЧ-излучателей часто препятствует малая толщина покрытий и, как следствие, трудноизмеримые приращения величин, характеризующих изменения амплитуды, волновой фазы или поляризации зондирующего излучения.

Тепловые методы измерения толщины пленок и покрытий основаны на измерении тепловых и излучательных характеристик изделия, коррелирующихся с толщиной покрытия. Основные причины возникновения погрешностей измерений этими методами – наличие посторонних источников тепла и турбулентной вариации теплопроводности окружающего воздуха.

В производственных условиях наибольший интерес представляют амплитудные методы инфракрасной техники. Оценка толщины покрытия в этом методе проводится по результатам измерения степени ослабления интенсивности излучения при его прохождении через полимерное покрытие. На точность измерений оказывают влияние выбор длины волны

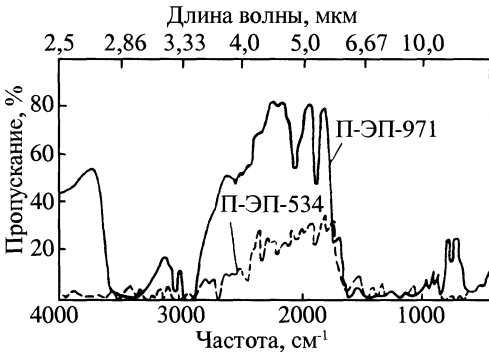


Рис. 8.46. Спектры пропускания порошковых эпоксидных красок, применяемых при производстве труб

излучения и ряд факторов, характеризующих объект, таких как шероховатость пленки и подложки, наличие рассеивающих и отражающих частиц и включений в полимерном материале, его химический состав и структура, кривизна, волнистость подложки и покрытия, скорость перемещения объекта контроля и величина его смещений относительно источника и приемника излучения.

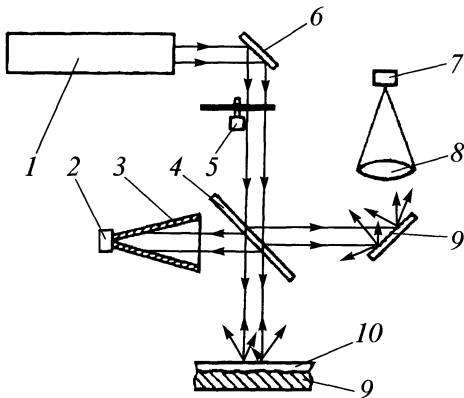


Рис. 8.47. Оптическая схема лазерного толщиномера:

- 1 – лазер; 2, 7 – соответственно измерительный и опорный пиродатчики; 3 – конический отражатель; 4 – светоделитель;
- 5 – механический прерыватель; 6 – поворотное зеркало; 8 – линза из GaAs; 9 – диффузный отражатель; 10 – покрытие; 11 – поверхность металла

Оптические свойства полимерных покрытий в инфракрасном диапазоне длин волн позволяют выбрать длину монохроматической волны, оптимальную для создания рабочих схем ИК-приборов. На рис. 8.46 приведены характерные спектры эпоксидных красок П-ЭП-534 и П-ЭП-971, применяемых при производстве труб. Видно, что выбор длины волны наиболее оптимален в пределах полосы пропускания красок (в диапазоне 4 ... 6 мкм), т.е. в области генерации СО-лазера. Современное состояние средств лазерной, инфракрасной, а также микропроцессорной техники позволяет использовать ее для решения поставленной задачи. Рассмотрим схему толщиномера с нормальными по отношению к трубе освещением и регистрацией зеркальной и (или) диффузной составляющих отраженного ИК-излучения (рис. 8.47).

Светоделитель 4 выполнен из пластины кремния толщиной 0,4 мм, линза 8 с апертурой 20 мм изготовлена из арсенида галлия. Приемниками 2 и 7 служат пиродатчики МГ-30, регистрирующие излучение, промодулированное с частотой 50 ... 500 Гц. Конический отражатель 3 и светоделитель 4 ограничивают после визирования измерительного датчика 2 телесный угол не более 0,13 стеррад. Индикатриса рассеяния диффузного отражателя 9 для излучения СО-лазера близка к сферической.

Схема работает следующим образом. Пучок от лазера ИЛГН-706, промодулированный механическим прерывателем 5, направляется через светоделитель 4 на слой покрытия 10. Излучение, отраженное от покрытия 10 и поверхности трубы 11, собирается отражателем 3 на пирозлектрический приемник 2. Часть излучения от лазера светоделителем отводится на диффузный отражатель 9, служащий для ослабления пучка, а затем собирается линзой 8 на опорный приемник 7.

Конструкция толщиномера схематически изображена на рис. 8.48. Толщиномер представляет собой наклонный опти-

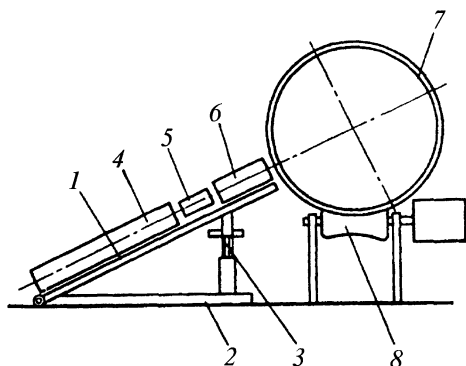


Рис. 8.48. Конструкция бесконтактного ИК-толщиномера на основе СО-лазера:

1, 2 – рамы; 3 – упор; 4 – излучатель;
5 – блок управления; 6 – оптическая схема;
7 – труба; 8 – валки

ческий стол, состоящий из двух шарнирно закрепленных рам 1 и 2, угол между которыми изменяется при помощи упора 3. На верхней раме 1 собрана оптическая система прибора, содержащая излучатель лазера 4, модулятор и два зеркала, объединенные в блок управления 5 лазерным пучком, и собственно оптическая схема 6 толщиномера. Модулятор в блоке 5 обеспечивает необходимую частоту следования световых импульсов (около 200 Гц), зеркала служат для совмещения пучка СО-лазера с оптической осью схемы 6. Блок 6 закрыт кожухом и имеет регулировку плиты, на которой установлены оптические элементы. Изменением угла между рамами стола и плитой блока 6 осуществляют направление пучка ИК-излучения по линии, проходящей через центр трубы 7, т.е. перпендикулярно поверхности покрытия. Зазор между блоком 6 и трубой 7 определяется диапазоном смещений трубы при ее транспортировке по валкам 8 и геометрией оптической схемы толщиномера. ИК-толщиномер располагается в технологической линии нанесения покрытий между установкой напыления и камерой полимеризации.

Результаты измерения толщины эпоксидного покрытия П-ЭП-534, нанесенного на трубы диаметром 1220 мм, вы-

полненного лазерным ИК-толщиномером при его испытаниях в линии нанесения покрытий, показаны на рис. 8.49. Приведенные на рисунке данные, являющиеся по существу градуировочными, получены с помощью ИК-толщиномера в процессе нанесения покрытия в горячем состоянии и дублировались магнитным толщинометром МТ-40 НЦ после охлаждения трубы до нормальной температуры. По оси ординат отложено отношение напряжений с измерительного и опорного пиродатчиков, пропорциональное отношению интенсивностей излучений, отраженного и рассеянного покрытием 1 и падающего на покрытие I_0 , по оси абсцисс – толщина покрытия.

Положенная в основу устройства схема измерений альбеде излучения слоя покрытия обладает сравнительно высокой ($\pm 20\%$) методической погрешностью, связанной, в частности, с непостоянством структуры слоя покрытия. Для технологических измерений, проводимых для статистического регулирования процесса покрытия, такая точность достаточна, поскольку контролируемый параметр – тол-

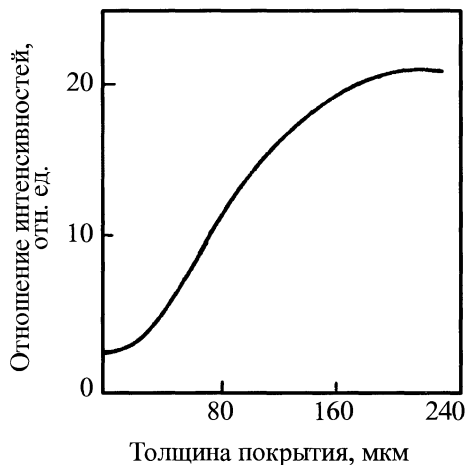


Рис. 8.49. Зависимость отношения интенсивностей I/I_0 , регистрируемых измерительным и опорным пиродатчиками от толщины покрытия П-ЭП-534

щина покрытия – имеет односторонний допуск (не менее 350 мкм). Достоверные результаты контроля средней толщины покрытия при этом могут быть получены в пределах 350 ... 450 мкм, что позволяет стабилизировать процесс покрытия труб на оптимальном уровне.

Разработанный лазерный толщиномер показал удовлетворительные результаты при контроле покрытий из полиэтилена, фторопласта и различных эпоксидных красок, предназначенных для изоляции труб большого диаметра магистральных нефте- и газопроводов, и используется на ряде трубных и трубопрокатных заводов.

8.4. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

8.4.1. Контроль полостей в собранных механизмах

Контроль автомобилей и дизельных машин. Эндоскоп является весьма эффективным прибором при решении многих трудных проблем визуального контроля при обслуживании и ремонте автомобилей, в частности при диагностировании двигателей. Его можно также вводить в отверстия узлов и осматривать состояние кулачков и шестерен, муфт и тормозов и других подвижных деталей с целью определения их износа. Например, цилиндры двигателей можно проверять через отверстия для свечей без удаления головки цилиндра (рис. 8.50). Стенки цилиндра, клапана, головка поршня надежно проверяются визуально. Повышенный износ, нагар и другие дефекты поверхности легко наблюдаются. Коленчатый вал и картер могут быть продиагностированы через отверстие корпуса без разборки и съема коленчатого вала. Подобным образом могут быть проверены механические или гидравлические передачи и дифференциал.

Рассмотрим примеры применения эндоскопов при контроле автомобилей и дизельных машин. Для осмотра трудно

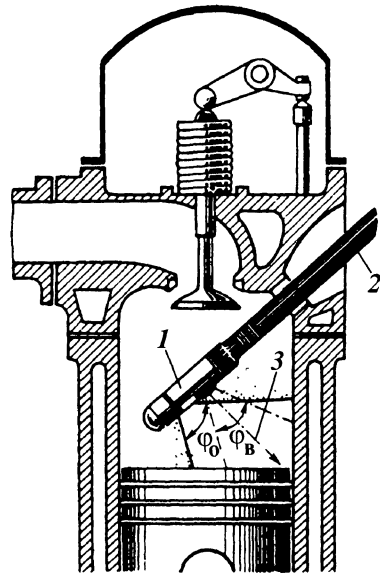


Рис. 8.50. Схема проверки цилиндра двигателя через отверстие с помощью жесткого эндоскопа:

1, 2 – соответственно головка и корпус эндоскопа; 3 – ось объектива;
 ϕ_0 , ϕ_B – соответственно углы освещения и визирования

доступных полостей различных деталей применяют жесткий эндоскоп, представляющий собой металлическую трубку, внутри которой помещена трубка с оптической системой. Последняя состоит из объективной и телескопической частей и окуляра. На конце объективной части имеются два окна: одно для наблюдения за исследуемой поверхностью, другое для пропуска пучков света от источника – лампочки, удерживаемой в наружной трубке резьбовым колпачком. На противоположном конце трубки расположена контактная муфта. Один из контактов лампочки соединен с муфтой изолированным проводом, проходящим по внутренней стенке наружной трубки, второй – через колпачок с корпусом прибора. На контактную муфту накладываются клещевые захваты со шнуром, соединенным с источником электрического тока напряжением 2,5 В.

Прибор позволяет осматривать полости диаметром от 5 мм и более и глубиной до 512 мм. При расстоянии объект-объектив 18 мм эндоскоп имеет 2–3-кратное увеличение, линейное поле зрения 12 мм и разрешающую способность не менее 18 лин/мм. При помощи этого прибора определяют качество поверхности, наличие механических загрязнений масляных каналов в шатунах и коленчатых валах дизеля.

В некоторых машинах имеются отверстия, недоступные для наблюдения жестким эндоскопом с прямой телескопической трубой. Например, неудобно контролировать цилиндры и клапаны ряда двигателей внутреннего сгорания.

В таких случаях применяют эндоскопы со смещенной оптической осью, например, на 45° . Прибор отличается тем, что для совмещения при изломе линии визирования окулярной трубки и телескопической трубы он снабжен отклоняющим блоком с зеркалом.

Характерным представителем этой группы приборов является прибор для контроля зазора поршневых колец. В основу прибора положен фотоэлектрический метод измерения интенсивности светового потока, прошедшего через измеряемый радиальный зазор между калиброванной обоймой и проверяемым поршневым кольцом. Для повышения точности и стабильности работы прибора применена схема сравнения двух световых потоков (рис. 8.51).

Световой поток от источника 1 (лазера), пройдя через полупрозрачное зеркало 2, разделяется на два потока. Основной измерительный поток *I* направляется через призму 5 в измеряемый зазор 7 между кольцом и обоймой и далее через электрооптический модулятор 9 и анализатор 10 на фотозлектронный умножитель 11. Отраженный поток *II* проходит через нейтральный светофильтр 13 и поляризатор 12 также на фотозлектронный умножитель 11. Световой поток *II* является эталонным и его интенсивность устанавливается рав-

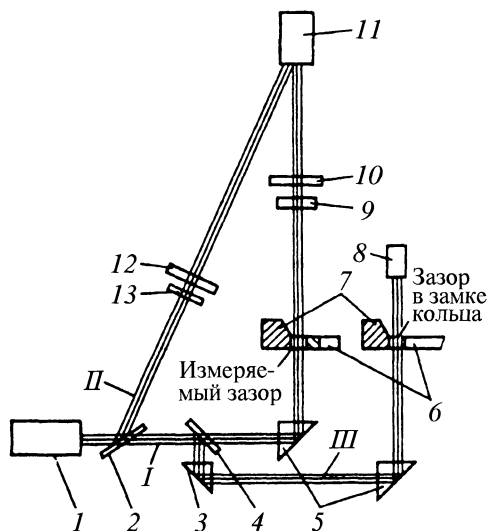


Рис. 8.51. Схема прибора для контроля зазора поршневых колец по радиальному зазору

ной интенсивности измерительного потока *I*, прошедшего через измеряемый зазор 0,01 мм с длиной дуги просвета, равной 2 мм.

Измерительный световой поток *I* модулируется электрооптическим модулятором 9 с частотой модуляции 70 кГц. В фотозлектронном умножителе происходит преобразование модулированного потока *I* и немодулированного потока *II* в электрический сигнал. Этот сигнал содержит постоянную и переменную составляющие, пропорциональные световым потокам *II* и *I*.

В зависимости от интенсивности световых потоков в момент измерения радиального зазора поршневого кольца изменяется напряжение сигнала на выходе электронной схемы прибора. Это напряжение подается на показывающий стрелочный прибор. Если в момент измерения интенсивность измерительного потока *I* превысит интенсивность эталонного потока *II*, что соответствует измеряемому зазору более 0,01 мм, то загорается сигнал "Брак по зазору". В случае, если измеряемое кольцо имеет зазор 0,003 ... 0,01 мм на суммарной дуге просвета более 45° , то срабатывает блок отбраковки по дуге и загорается сигнал "Брак по дуге".

Для исключения влияния зоны замка поршневого кольца на результаты измерения в схему введен дополнительный фотодиод 8. Световой поток III подается от полупрозрачного зеркала 4 через призмы 3 и 5 и далее через зазор в замке 6 поршневого кольца на фотодиод 8. Работает схема следующим образом: световой поток III, перекрытый установленным в обойму поршневым кольцом, при вращении обоймы проходит сквозь зазор в замке на фотодиод. Импульс напряжения с фотодиода запускает измерительную электронную схему с некоторой задержкой во времени, достаточной для перемещения замка из одного положения в другое. Следовательно, измерение радиального зазора начинается на расстоянии 3 ... 4 мм от замка. При повторном прохождении замка через начальное положение второй импульс напряжения, снимаемый с фотодиода, выключает измерительную электронную схему, и измерение зазора прекращается на расстоянии в 3 ... 4 мм до замка. Таким образом, зона 3 ... 4 мм по обе стороны от замка из контроля исключается.

Оригинальное лазерное устройство для определения размеров отверстий зазоров предложено американской фирмой Bord Warher. Лазерный луч, проходя через отверстие, образует дифракционную картину, фиксируемую на определенном расстоянии от отверстия. Картина регистрируется фотодетектором и пересчетным устройством.

8.4.2. Лазерные методы контроля в машиностроении

Измерительные устройства, работающие на принципе регистрации отраженного луча, по принципу работы можно разделить на следующие две группы: устройства, у которых луч отражается от подвижного элемента оптической системы; устройства, у которых луч отражается непосредственно от проверяемой детали. По виду регистрации излучения измерительные средства разделяются на: устройства, регистрирующие создаваемую интерференционную картину; регистрирующие луч, непосредственно отраженный от проверяемой детали или узла, а также регистрирующие разность величин отраженных потоков от проверяемой детали или узла и эталона.

Все эти средства делят на устройства, работающие с сфокусированным лучом и с нефокусированным лучом.

В настоящее время разработано и внедрено значительное количество лазерных измерительных систем, основанных на использовании одночастотных интерферометров. На рис. 8.52 представлена основная схема двухлучевого интерферометра, в котором оптический фронт волны делится полупрозрачным зеркалом таким образом, что два луча проходят различные оптические пути, прежде чем они взаимодействуют с образованием интерференционной картины. Схема используется для считывания полос.

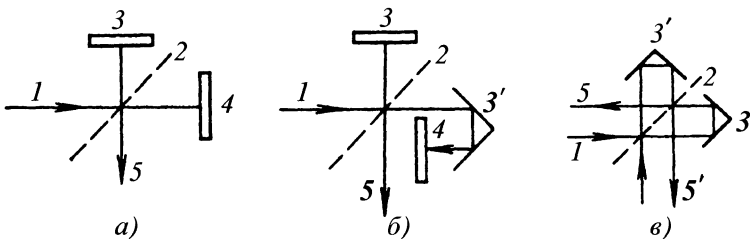


Рис. 8.52. Схема двухлучевого интерферометра:

a – базовая схема; *б* – схема с уголковым отражателем; *в* – схема с двумя уголковыми отражателями; 1 – лазер; 2 – разделительная пластина; 3, 4 – соответственно неподвижное и подвижное зеркало; 3' – уголкового отражателя; 5, 5' – выходы оптической схемы

Двухлучевой интерферометр состоит из разделительной пластины 2 и двух зеркал 3 и 4 (рис. 8.52, а). Излучение от лазера 1 падает на разделительную пластину. Часть света отражается от нее и направляется на неподвижное зеркало 3, другая часть проходит пластину и поступает на перемещающееся зеркало 4. Отразившись от зеркал, пучки света соединяются на разделительной пластине и интерферируют. На выходе 5 оптической схемы подсчитываются интерференционные полосы.

Подсчитывая число полос K и зная длину волны источника излучения λ , определяют величину перемещения подвижного зеркала

$$L = K \frac{\lambda}{2}.$$

Эта схема не нашла практического применения в промышленности, так как она требует особой точности при настройке.

Эта трудность преодолена в двух интерферометрических схемах, показанных на рис. 8.52, б, в, благодаря использованию уголкового отражателя в качестве подвижного зеркала. Уголкового отражателя 3' состоит из трех взаимноперпендикулярных отражающих поверхностей. Он обладает свойством отражать луч света, падающий на одну из его граней, обратно вдоль лучей параллельно направлению их падения. Интерференционная установка, включающая уголкового отражателя, является таким образом нечувствительной к его поворотам. Однако необходимо ограничивать боковые перемещения в интерферометрах с тем, чтобы отраженный свет падал на полупрозрачное зеркало и обеспечивал наложение двух лучей. Расогласования, соответствующие 1/10 части диаметра оптического луча, считаются нормально допустимыми.

Весьма перспективным считается использование двухчастотного лазерного интерферометра. В качестве источника излучения используются два лазера с различной частотой, отличающейся на

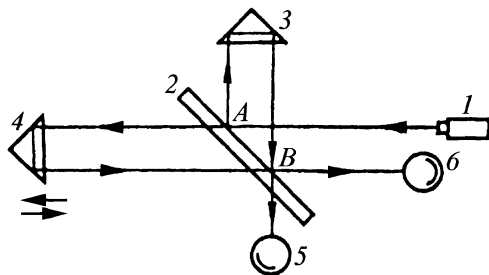


Рис. 8.53. Схема прибора для контроля перемещения стола координатно-расточного станка

500 кГц. Пучки этих лазеров падают на разделяющую пластину, отраженные от нее пучки смешиваются на фотоприемнике. Частота биения служит опорным сигналом. Прошедший через разделительную пластину пучок от одного лазера проходит в интерферометре постоянный путь, а пучок от второго лазера – переменный путь, изменяющийся при перемещении подвижного уголкового отражателя.

Опорный и переменный сигналы, поступающие на реверсивный счетчик, имеют одинаковую частоту, когда уголкового отражатель неподвижен. При его перемещении частота переменного сигнала изменяется в зависимости от величины этого перемещения.

Разность частот фиксируется реверсивным счетчиком. Перемещению отражателя на $\lambda/4$ соответствует изменение частоты на 1 кГц. В отличие от систем, работающих на одной частоте, двухчастотная система практически не подвержена влияниям температуры, турбулентности атмосферы и т.д. Возможно использование видоизмененного варианта с применением двухчастотного лазера с частотами, отличающимися на 500 кГц.

Характерным представителем измерительного устройства, у которого луч отражается от подвижного элемента оптической системы с регистрирующей интерференционной картины, является прибор для контроля перемещения стола координатно-расточного станка, схема которого изображена на рис. 8.53. Поток от лазера 1

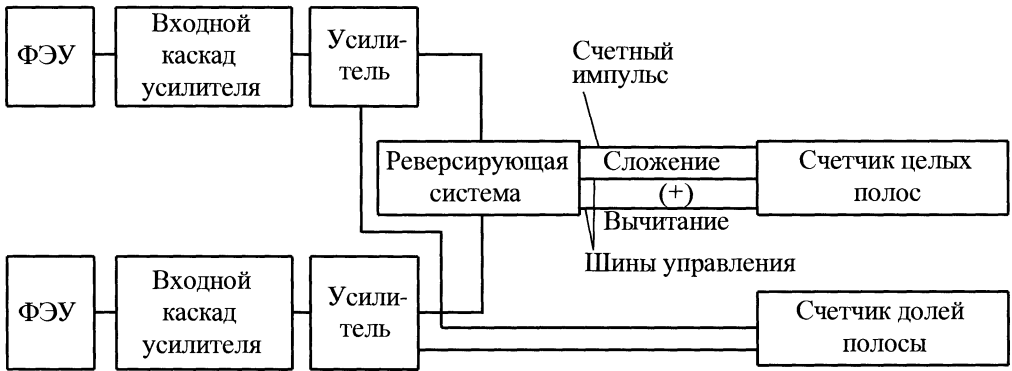


Рис. 8.54. Блок-схема электронной части прибора для контроля перемещения стола координатно-расточного станка

встречает на своем пути в точке *A* светоразделительную пластину 2, которая делит его на два потока. Один поток лучей направляется к зеркальной призме 3, закрепленной на подвижном столе станка, другой к зеркальной призме 8, закрепленной неподвижно. Отраженные лучи встречаются в точке *B* светоразделительной пластины и возникающая интерференционная картина при перемещении стола станка в ту или другую сторону улавливается фотоумножителями 5 и 6, которые преобразуют полученные сигналы в электрические импульсы, отчитываемые быстродействующим электронным реверсивным счетчиком.

Для того, чтобы электронная система могла определить направление движения стола, применена система с двумя фотоумножителями. Интерференционная картина, поступающая на один фотоумножитель, смещена по фазе относительно интерференционной картины, поступающей на второй фотоумножитель. Этот сдвиг принимается равным 90° .

Блок-схема электронной части системы представлена на рис. 8.54. Изменение светового потока вызывает изменение фототока, идущего через фотоумножитель. Ввиду большой нагрузки фотоумножителя, составляющей иногда несколько десятков мегаом, между блоком фотоум-

ножителей и усилителем ставят входной каскад. Последний обычно представляет собой катодный повторитель либо каскад с катодной связью. Сигналы от каждого фотоумножителя увеличиваются соответствующим усилителем и поступают на реверсирующую систему, которая вырабатывает счетный импульс и по соотношению фаз сигналов определяет направление счета.

На счетчик полюс поступает счетный импульс и сигналы, показывающие направление счета. Счетчик целых полюс имеет возможность производить как сложение, так и вычитание.

По этому же принципу работает лазерный интерферометрический калибратор (рис. 8.55). Прибор предназначен для контроля настройки суппортов станков. Луч света проходит от лазера 1 через светоразделительную пластину 2, оптическую систему 3 и попадает на отражатель 4. При перемещении отражателя 4, который устанавливается на подвижной части станка 5, плывущая интерференционная картина создает серию импульсов в фотодетекторе 10. Электронные импульсы поступают в электронный блок, состоящий из быстродействующего счетчика 9, цифрового вычислительного устройства для преобразования числа интерференционных полюс в линейный размер 8, цифрово-

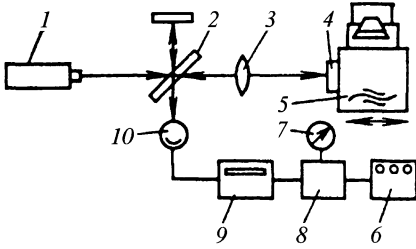


Рис. 8.55. Схема лазерного интерферометрического калибратора:

- 1 - лазер; 2 - светоделительная пластинка;
- 3 - оптическая система; 4 - отражатель;
- 5 - станок; 6 - цифровой указатель;
- 7 - барометр; 8 - вычислительное устройство;
- 9 - счетчик

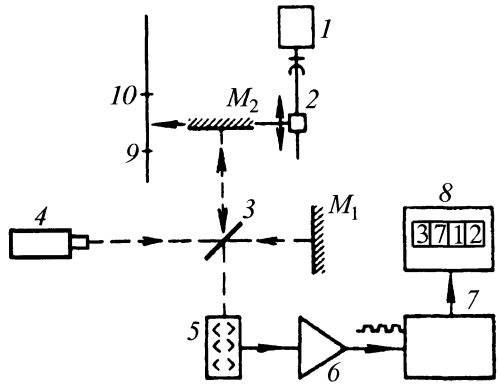


Рис. 8.56. Схема прибора для калибровки отсеченных шкал:

- 1 - двигатель; 2 - микрометрический винт;
- 3 - зеркало; 4 - лазер; 5 - фотоумножитель;
- 6 - усилитель; 7 - счетчик; 8 - цифровой указатель;
- 9, 10 - проверяемые интервалы

го указателя 6 и барометра 7, который вносит поправку в вычислительное устройство на изменение скорости света в зависимости от атмосферного давления.

При калибровке отсчетных шкал используется измерительное устройство, изображенное на рис. 8.56. В начале измерения плоскость подвижного зеркала M_2 совмещается с началом проверяемого интервала 9. С помощью микрометрического винта 2, приводимого в движение двигателем 1, зеркало перемещается к концу проверяемого интервала 10. Отраженные световые потоки лазера 4 от зеркал M_1 и M_2 образуют на зеркале 3 интерференционную картину, которая проектируется на фотоумножитель 5. Импульсы после фотоумножителя проходят усилитель 6 и поступают в счетчик 7, соединенный с цифровым указателем 8.

Недостатком данной конструкции является сложность изготовления направляющих подвижного зеркала, от точности которых зависит получение истинного размера между штрихами калибруемой шкалы.

По принципу регистрации отраженного фокусированного луча работает установка для контроля зазоров в труднодоступных местах, принципиальная схема которой изображена на рис. 8.57. Принцип действия установки основан на изменении интенсивности отраженного светового потока при перемещении луча по кромке перпендикулярно к контролируемому зазору.

При попадании луча в зазор происходит его расфокусировка, изменяется интенсивность отраженного потока.

Схема устройства базируется на применении интерферометра, содержащего лазер 1, светоделительную пластину 2, неподвижное зеркало 3, полупрозрачную пластину 4, зеркало 5 и объектив 6. В схеме использованы также фотоэлектронные умножители 8 и 9, усилитель 10 и цифровой счетчик 11.

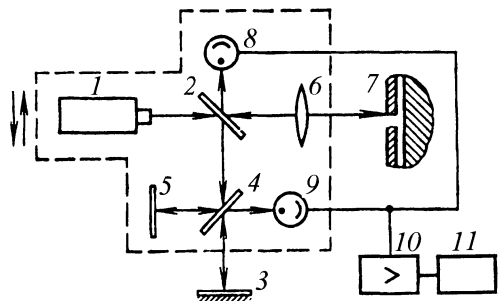


Рис. 8.57. Принципиальная схема установки для контроля зазоров в труднодоступных местах:

- 1 - лазер; 2 - светоделительная пластинка;
- 3 - неподвижное зеркало; 4 - полупрозрачная пластинка; 5 - зеркало; 6 - объектив;
- 7 - проверяемый зазор; 8, 9 - фотоумножители;
- 10 - усилитель; 11 - счетчик

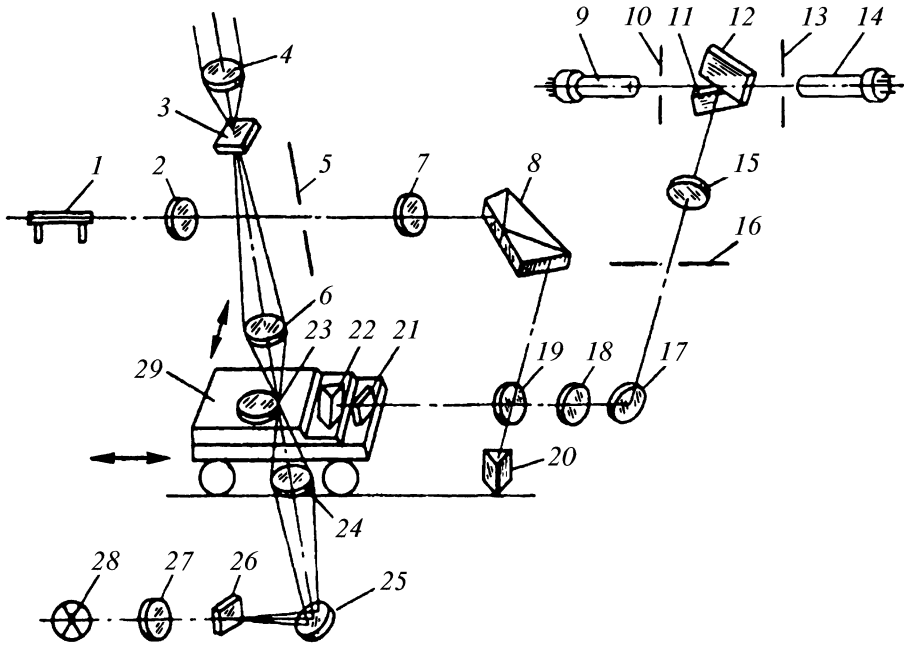


Рис. 8.58. Схема прибора для контроля отверстий

Лазер, светоразделительная пластина, полупрозрачная пластина и зеркала располагаются на неподвижной части установки. Луч лазера 1 попадает на светоразделительную пластину 2, которая разделяет луч на два потока, один из которых направляется к неподвижному зеркалу 3, а второй – к проверяемому зазору 7, расположенному в фокальной плоскости объектива 6.

Световой поток, отразившись от проверяемого зазора, попадает на светоразделительную пластину и через нее на приемник лучистой энергии, другой поток, попадая на подвижное и неподвижное зеркала, создает интерференционную картину, поступающую на фотоэлектронный умножитель. При перемещении светового луча в направлении измеряемого зазора он скачкообразно переходит с фокальной плоскости в зазор, при этом происходит расфокусировка луча, а следовательно и изменение величины отраженного светового потока, что дает команду счетчику о

начале отсчета интерференционных полос. При прохождении зазора луч снова попадает в фокальную плоскость объектива, изменяется величина отраженного светового потока и фотоумножитель 8 выдает команду на отключение фотоумножителя 9, электрически связанного с ним усилителя 10 и цифрового счетчика 11.

Сочетание интерференционного метода с фотоэлектрическим двухканальным устройством позволяет измерить зазоры в пределах монохроматичности осветителя с высокой точностью. По этому же принципу использования отраженного луча в качестве индикатора начала и конца отсчета работает устройство для контроля диаметра прецизионных отверстий, схема которого приведена на рис. 8.58. Она объединяет системы оптического щупа для наведения на образующие отверстия и двухлучевого интерферометра со счетчиком полос.

Изделие 23 с измеряемым отверстием располагается на каретке 29, имеющей

продольное и поперечное перемещения.

Система оптического шупа предназначена для точного наведения на образующую отверстия. Основой метода является получение изображения марки, проецируемой в плоскость объекта (проверяемого отверстия) и наблюдение этого изображения через микроскоп. Всякое смещение отражающей поверхности отверстия вызывает смещение изображения марки в поле зрения микроскопа.

Марка 26 освещается лампочкой накаливания 28 через конденсор 27. Пластина 25, имеющая зеркальное покрытие, служит для поворота пучка лучей. Объектив 24 проецирует изображение марки в плоскость измеряемого отверстия. Отраженное (зеркальное) изображение марки рассматривается через микроскоп с объективом 6 и окуляром 4 с сеткой биссектора 3. Погрешность введения изображения марки в биссектор при общем увеличении микроскопа $50\times$ не превышает 0,2 мкм.

Для измерения линейного размера использована система двухлучевого интерферометра с фотоэлектрической регистрацией интерференционных полос.

Пучок лучей от лазера 1 собирается конденсором 2 на выходной щели 5, находящейся в фокальной плоскости объектива 7 коллиматора. Проходя через призму 8, луч разлагается на ряд пучков, соответствующих отдельным видам спектра излучения лазера. Разделительная пластина 19, имеющая полупрозрачное покрытие, делит падающий пучок лучей на две части. Первая часть проходит плоскопараллельную пластину 21 и попадает на прямоугольную призму 22, которая отражает пучок лучей к разделительной пластине. Вторая часть лучей проходит через разделительную пластину и, отразившись в прямоугольной призме 20, возвращается.

Оба пучка лучей встречаются вновь на разделительной пластине и идут далее в зрительную трубу, состоящую из объектива 18, зеркала 17, осуществляющего поворот пучка лучей на 90° , и выходной ще-

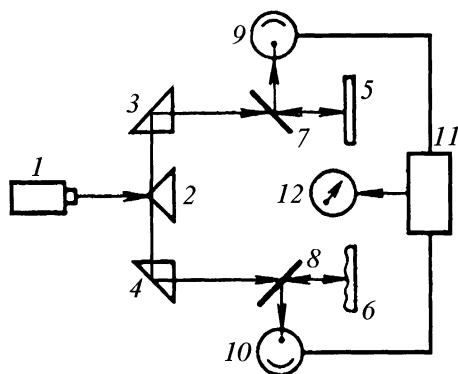


Рис. 8.59. Схема установки для сравнения шероховатости поверхности детали с эталоном:

1 – лазер; 2 – призма; 3, 4 – преломляющая призма; 5 – эталон; 6 – проверяемая поверхность; 7, 8 – полупрозрачные зеркала; 9, 10 – ФЭУ; 11 – сравнивающее устройство; 12 – показывающий прибор

ли 16. Дополнительный объектив 15 позволяет получить четкую интерференционную картину в плоскостях щелей 10 и 13. Зеркала 11 и 12 делят интерференционное поле на две части, и интерференционные полосы попадают на щели фотодетекторов.

Полосы, поступающие на щель 10, сдвинуты относительно полос, поступающих на щель 13, на одну четверть. Световой поток, попадающий на фотомножители 9 и 14, возбуждает в последних фототок, поступающий на вход электронной части установки. Счет числа полос производит реверсивный декадный счетчик.

По принципу сравнения двух потоков работает установка, предназначенная для сравнения шероховатости поверхности проверяемой детали с эталоном. Принципиальная схема установки изображена на рис. 8.59. От лазера 1 луч, попадая на призму 2, разделяется на два потока. Пройдя преломляющие призмы 3 и 4 и полупрозрачные зеркала 7 и 8, потоки попадают на эталон 5 и проверяемую поверхность 6, отразившись от них и полупрозрачных зеркал 7 и 8, потоки попадают на фотоэлектронные умножители 9 и 10. С

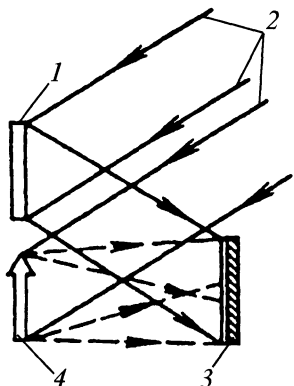


Рис. 8.60. Схема получения голограммы:
1 – зеркало; 2 – поток излучения;
3 – фотопластинка; 4 – объект

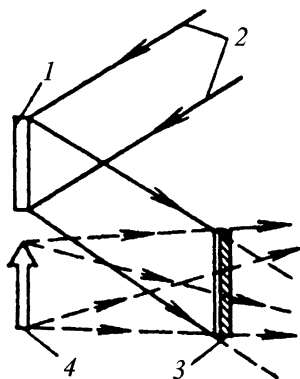


Рис. 8.61. Схема восстановления изображения с помощью голограммы

фотоэлектронных умножителей сигнал, преобразованный в электрический ток, поступает в сравнивающее устройство 11, которое передает на стрелочный прибор 12 данные о соответствии или несоответствии проверяемой поверхности эталону. Точность работы такого устройства зависит в основном от вида применяемого приемника лучистой энергии и его чувствительности.

В настоящее время создаются приборы на основе голографии, развитие которой связано с появлением лазеров. В отличие от фотографии, которая регистрирует только интенсивность рассеянного света (амплитудные соотношения), голография позволяет полностью записать фронт световой волны (пространственную структуру волны), рассеянной объектом. Это достигается с помощью интерференционной картины, которая одновременно фиксирует как амплитудные соотношения рассеянного света, так и ее фазовые соотношения, обуславливающие взаимное расположение темных и светлых пятен.

Для получения голограммы необходимо, чтобы на фотозульсию фотопластинки 3 одновременно с излучением 2, рассеянным объектом 4 попадала также и некоторая часть излучения, отраженная

зеркалом 1 (рис. 8.60). При этом необходимо, чтобы излучение, рассеянное объектом 4, могло интерферировать с пучком, отраженным от зеркала 1. Образующаяся интерференционная картина регистрируется фотопластинкой 3. Экспонированная таким образом и проявленная фотопластинка представляет собой голограмму.

Образование видимого изображения с помощью голограммы называют стадией восстановления изображения. Чтобы увидеть изображение объекта в пространстве, голограмму 3 просвечивают опорным пучком света 2, отраженным от зеркала 1 (рис. 8.61). Под углом к освещающему пучку появляется изображение объекта 4. Наблюдатель видит объемный объект 4 висящим в пространстве. На него можно смотреть из разных положений.

Изображения, получаемые в голограмме, обладают интересной особенностью. Если голограмму "расколоть" на несколько кусков, то каждый из них при просвечивании дает ту же картину, что и целая голограмма. Это свойство связано с тем, что каждая точка фотопластинки при экспонировании подвергается действию света, рассеянного всеми точками объекта, и, наоборот, свет, рассеянный каждой точкой объекта, освещает всю поверхность

фотопластинки, поэтому на каждом небольшом участке голограммы в закодированной форме хранится все изображение.

Голографическая интерферометрия идеально подходит для обнаружения малых деформаций по интерференционным полосам, но ее единица измерения (расстояние между двумя интерференционными полосами) слишком точна для контроля обрабатываемого изделия. Для практического применения этого метода необходимо увеличить расстояние между полосами.

Сущность метода состоит в следующем. Изготавливают две голограммы одного и того же объекта при двух различных длинах волн, отличающихся между собой, например, на один процент. Возникающие биения между двумя системами интерференционных полос приводят к увеличению расстояния между полосами, что и требуется для контроля обработки деталей на станках.

Два основных метода голографической интерферометрии – метод временно-го усреднения и двойной экспозиции используют для выявления скрытых дефектов в материалах, для изучения усталости металлов, вибрационных свойств звуковых генераторов, процессов сгорания в ракетных двигателях и при решении многих других технических задач.

Лазерные измерители линейных перемещений. Японские фирмы осваивают измерительные устройства, спроектированные на основе использования принципов триангуляции (рис. 8.62). Принцип действия схем заключается в следующем: фиксируется расстояние L между лазером 1 и фотодетектором 3 и угол α . Одна из схем с автоматическим слежением по углу β и записью углов α и β предназначена для измерения поверхности 2 тел вращения.

Большой интерес представляет метод измерения перемещений, основанный на точном определении фокуса отраженного луча. В большинстве схем осуществляется контроль продольного, а в некоторых –

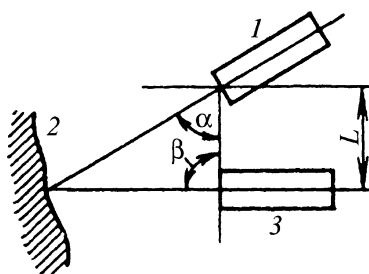


Рис. 8.62. Схема измерительного устройства, основанного на использовании принципа триангуляции

поперечного перемещения светового пятна. На рис. 8.63 приведена типовая схема определения положения фокуса с двумя фотоэлементами.

На рис. 8.64 приведен пример конструктивной реализации метода фокусировки для определения размеров.

Принцип действия установки заключается в следующем. Луч лазера 1 проходит через полупрозрачное зеркало 2 и фокусируется линзой объектива 3 на поверхности измеряемой детали 4 . Эта же линза 3 собирает свет, рассеянный поверхностью измеряемой детали 4 , в параллельный пучок, который отклоняется полупрозрачным зеркалом 2 на 90° и фокусируется линзой 5 . В фокусе линзы 5 помещена диафрагма 6 , закрепленная на вершине камертона 7 , который колеблется от генератора 8 . Диаметр диафрагмы 6 равен диаметру изображения пятна лазера.

После диафрагмы 6 световой поток падает на фотодетектор 9 . Электрический сигнал с выхода фотодетектора 9 попадает на предварительный усилитель 10 , откуда подается на фазочувствительный детектор 11 , сюда же поступает опорный сигнал от генератора 8 . Напряжение с выхода фоточувствительного детектора 11 подается на сервоусилитель 12 , а после него – на сервомотор 13 , который обрабатывает сигнал ошибки, перемещая датчик 14 в одном из направлений до тех пор, пока измеряемая деталь 4 не попадет в фокус линзы объектива 3 .

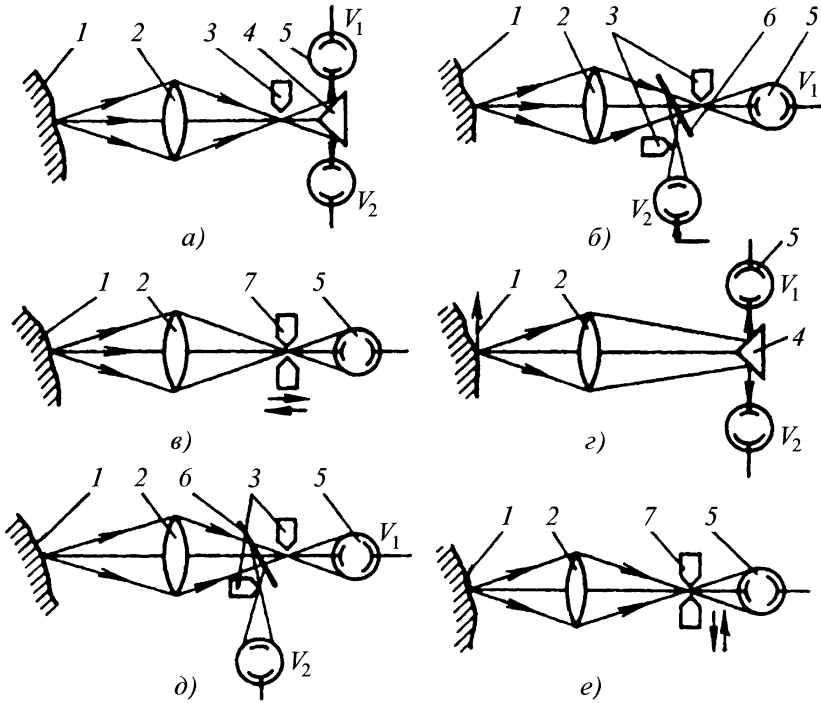


Рис. 8.63. Схема положения фокуса:

1 – контрольная поверхность; 2 – объектив; 3 – прерыватель; 4 – призма; 5 – фотодетектор; 6 – полупрозрачное зеркало; 7 – вибрирующая диафрагма

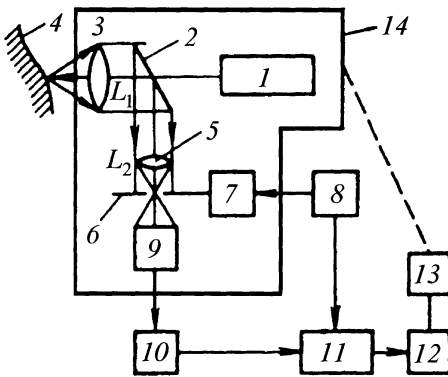


Рис. 8.64. Схема установки контроля размеров методом фокусировки:

1 – лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – объектив; 4 – измеряемая деталь; 5 – линза; 6 – диафрагма; 7 – камертон; 8 – генератор; 9 – фотодетектор; 10 – усилитель; 11 – детектор; 12 – сервоусилитель; 13 – сервомотор; 14 – датчик

Принцип действия схемы основан на точном автоматическом совмещении изображения первого фокуса линзы L_1 со вторым фокусом линзы L_2 . При фокусировке лазерного луча на поверхности измеряемой детали, на диафрагме размер сфокусированного пятна будет минимальным. Если измеряемую деталь переместить вдоль оси лазерного луча, диаметр пятна на поверхности детали увеличивается, а положение изображения этого пятна сместится с заднего фокуса линзы 5, при этом уменьшится интенсивность света, проходящего через диафрагму 6, следовательно, уменьшится световой поток, попадающий на фотодетектор. При колебаниях диафрагмы с частотой ν происходит модуляция светового потока с частотами ν и 2ν . Фаза сигнала частоты ν меняется на π в зависимости от знака смещения измеря-

мой детали относительно положения фокуса линзы объектива ($x < 0$ или $x > 0$).

Сигнал переменного тока с фотодетектора поступает на предварительный усилитель, а затем на фоточувствительный детектор, выходное напряжение которого пропорционально в пределах некоторого интервала расфокусировки ω величине $x \leq \omega$.

Напряжение с выхода фазочувствительного детектора, усиленное сервоусилителем, поступает на электродвигатель. Двигатель, вращаясь, перемещает датчик до тех пор, пока фокус отраженного сигнала не переместится в центр диафрагмы модулятора.

Несомненный интерес представляет схема лазерных интерферометров, при использовании которых исключается необходимость в подвижном зеркале для отражения измерительного пучка.

Принцип действия одной из измерительных установок сводится к следующему (рис. 8.65). Лазер 7 излучает когерентный световой луч в обе стороны. Направленный свет с одной стороны отражается от поворотного зеркала 6, а затем, проходя линзу 5, от полупрозрачного зеркала 4 и падает на фотодетектор 1 в качестве эталонного луча. Свет лазера, направленный в другую сторону, отражается от измеряемой поверхности 10 и формируется собирающей линзой 9 и линзой 8 в параллельный пучок, который проходит через полупрозрачное зеркало 4, обеспечивая поступление отраженного сигнала на фотодетектор 1. Фотодетектор реагирует на сумму отраженного и эталонного сигналов. Если отраженный и эталонный сигналы совпадают по фазе, то электрический сигнал с фотодетектора достигает максимума; если отраженный и эталонный сигналы по фазе не совпадают, то сигнал с фотодетектора уменьшается, достигая минимального значения при сдвиге на 2λ . Следовательно, выходной сигнал фотодетектора является функцией смещения по фазе между эталонным и отраженным

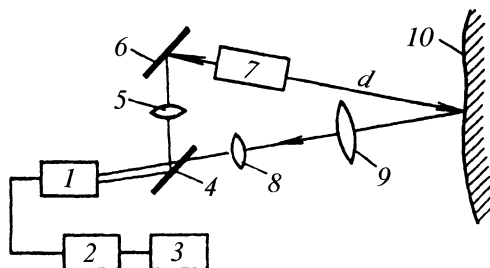


Рис. 8.65. Схема установки для контроля размеров:

- 1 – фотодетектор; 2 – вольтметр;
- 3 – записывающее устройство;
- 4 – полупрозрачное зеркало; 5, 8, 9 – линзы;
- 6 – поворотное зеркало; 7 – лазер;
- 10 – измеряемая поверхность

сигналами, т.е. функцией расстояния d от лазера до измеряемой поверхности.

Электрический сигнал с фотодетектора поступает на вольтметр 2 и записывающее устройство 3, которое вычерчивает непрерывную диаграмму профиля поверхности. Вольтметр и записывающее устройство выбирают такими, чтобы можно было обеспечить работу в широком диапазоне напряжений. Рассмотренная измерительная схема предназначена в основном для измерения шероховатости поверхности.

Лазерные измерительные устройства могут найти самое широкое применение для контроля прямолинейности, размеров отверстий и зазоров.

Фирма Ferranti, например, использует лазерное устройство для контроля и точной доводки плоских поверхностей деталей станков и машин и для измерения прямолинейности валов. Устройство предназначено для работы на расстояниях до 5 м. Измерительная система включает в себя источник питания, блок с ОКТ, датчик и два регистратора отклонения луча, один из которых вольтметр, а другой – световой индикатор крайних положений лазерного луча, настраиваемый на определенный интервал отклонений. В оптической схеме используется специальная сложная призма, работающая в качестве делителя луча при настройке. Если в ре-

зультате расфокусировки луч отклоняется от заданного направления, призма его раздваивает, что позволяет произвести подрегулировку оптики. Момент установки луча в заданном направлении определяется по нулевому показанию вольтметра.

При конструировании и создании лазерных измерительных систем рекомендуется в качестве электронных усилителей, работающих совместно с приемниками лучистой энергии, использовать усилители тока. При этом повышается стабильность работы всего прибора, облегчается регулирование, проще осуществляется переход к автоматизации процесса, контролируемого или выполняемого с помощью данного прибора. Однако при этом требуется, чтобы сигнал, поступающий с приемника на вход усилителя, был переменным, что достигается с помощью различных видов модуляции.

Эффекты бликования лазерного излучения и их использование в задачах контроля. Свойства испускаемого лазером когерентного излучения при некоторых обстоятельствах могут быть использованы непосредственно для осуществления контроля, что исключает сложности, связанные с регистрацией голограммы. Одно из характерных свойств лазерного света заключается в том, что при его рассеянии объектом поверхность кажется покрытой "бликами" – мелкими светлыми и темными областями, которые смещаются с изменением точки наблюдения. Простое качественное объяснение этого эффекта следующее: каждый элемент "бликующей" поверхности представляет собой крошечную область, которую может еще разрешить глаз или оптическая система, и поскольку эта область может быть весьма большой по сравнению с длиной волны, свет, рассеянный ею, представляет собой совокупность волн со случайной разностью фаз. Эти волны векторно интерферируют друг с другом, создавая некоторую результирующую интенсивность, которая может принимать произвольные значения от нуля до определенного максимального значения. Статистически распределение

интенсивности разрешаемых областей в указанных пределах случайно, так что каждая область как бы имеет яркость, отличную от яркости соседней, в результате чего и возникает эффект "бликования".

Таким образом, картина распределения бликов связана с тонкой структурой поверхности и с разрешающей способностью оптической системы, используемой для ее наблюдения. Уменьшение разрешающей способности, например путем ограничения апертуры глаза, приводит к увеличению видимого размера бликов.

Показана возможность использования эффекта бликования для обнаружения движения поверхности и, что более важно с точки зрения контроля, для обнаружения усталостных эффектов. Соответствующее устройство, изображенное на рис. 8.66, направляет луч лазера на поверхность испытываемого образца, рассеянное излучение попадает на фотографическую пластинку, которая регистрирует "отпечаток" бликов поверхности. После обработки фотопластинка возвращается точно в исходное положение и играет роль негативной маски. При точном возвращении фотопластинки пропущенное ею световое поле однородно (рис. 8.67, а). Пропущенный свет собирается линзой и фокусируется на фотоприемник.

Если поверхность объекта каким-либо образом искажается или изменяется ее отражательная способность, согласование негатива и картины бликов оказывается неполным и фотоприемник регистрирует возрастание сигнала. Этот эффект иллюстрируется на рис. 8.67, б–г. На них показано появление пропускаемого фотопластинкой светового поля при наличии поступательного и вращательного рассогласования объекта относительно исходного положения.

Точно так же, как в голографическом методе, описанном в предыдущем разделе, корреляция между картиной бликов до и после тонкого изменения оптических свойств поверхности может быть использована для обнаружения усталостных эффектов или коррозии. Простота метода

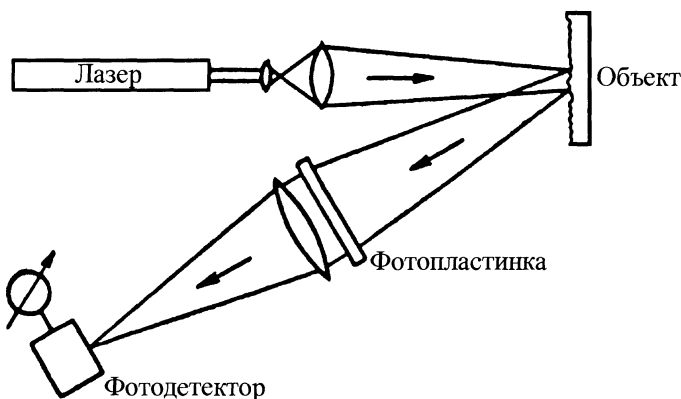


Рис. 8.66. Схема экспериментальной установки для сравнения регистрируемой и текущей картин бликов на поверхности

позволяет проводить динамические измерения. Например, в то время как образец колеблется относительно своего положения покоя, выходной сигнал фотоприемника может быть визуализирован с помощью осциллографа.

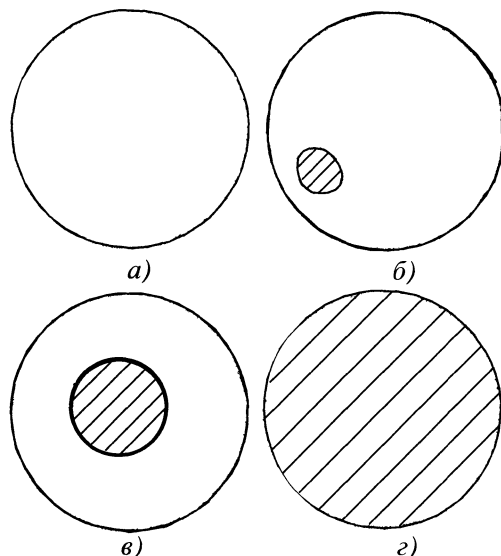


Рис. 8.67. Картины, обусловленные наложением зарегистрированной и реальной картин бликов:

а – значительное рассогласование;
 б – рассогласование за счет некоторого смещения; в – незначительное рассогласование за счет сдвига и поворота; г – полное согласование

Голографический метод регистрации распределения узловых областей на вибрирующей поверхности дополняется методами, основанными на применении эффекта бликования лазерного излучения. Исследуемая поверхность освещается лазерным пучком и наблюдается с помощью телескопа, имеющего малый входной зрачок. Это ограничивает разрешающую способность системы, и картина бликов выглядит достаточно грубой. Одновременно часть прямого излучения лазера подается в телескоп для создания однородного поля зрения, занимающего такую же область пространства, что и исследуемая поверхность. Этот свет интерферирует с "бликующим" светом, создавая новую бликованную картину.

Если теперь поверхность объекта смещается по направлению к наблюдателю или от него, то блики становятся периодически то яркими, то темными, точно так же как интерференционные полосы. Результирующее "мерцание" картины бликов позволяет с большой чувствительностью обнаруживать движение поверхности. Более того, если поверхность вибрирует, то блики размываются до однородной яркости, а узловые области, будучи неподвижными, остаются покрытыми высококонтрастными бликами. Этот визуальный метод позволяет довольно быстро определить распределение узловых точек

на вибрирующей поверхности, причем сложность, связанная с фотографической регистрацией, исключается.

8.5. ПРИМЕНЕНИЕ ОНК В СУДОСТРОЕНИИ

Лазерные опорные системы (ЛОС) для контроля соосности и центровки элементов кораблей. Область применения лазерных опорных систем в монтажных работах распространяется в основном на те виды контрольно-измерительных работ, которые обеспечивают высокую точность взаимного положения объектов и их элементов относительно эталонных реперов (линий, плоскостей).

В этой связи ЛОС применяют при монтаже оборудования в различных отраслях народного хозяйства, например, в станкостроении – для контроля опорных поверхностей станков (направляющих), в машиностроении – при монтаже и выверке компрессоров, оборудования прокатных станов, конвейеров для автоматической обработки листового стекла и т.д. К основным преимуществам ЛОС относятся высокая точность и объективность измерения, возможность автоматизации процесса выверки монтируемого оборудования, самих измерений.

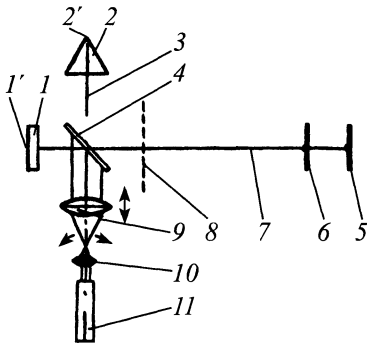


Рис. 8.68. ЛОС для контроля опорных поверхностей станков:

- 1, 2 – призмы; 1', 2' – ребра призм; 3 – ось коллимации; 4 – расщепитель пучка; 5, 6 – экраны; 7 – выходная ось; 8 – контрольный экран; 9, 10 – линзы коллиматора; 11 – лазер

ЛОС для судостроения позволяют измерять прогиб палубы под действием деформации, изгиб гребного вала, удлинение судов при наращивании и стыковке отдельных частей корпусов, углы между отдельными частями и элементами конструкции судна внутри корпуса и на палубе; проводить поверочно-разметочные работы, например, при контуровке секций судна, а также пробивке световой оси валопровода, установке опор, подшипников и т.д.

Однако ЛОС для судостроения требуют более тщательной защиты от воздействия дестабилизирующих факторов (нестабильности пучка лазерного излучения в пространстве с течением времени, влияния среды распространения и фоновых засветок на точностные показатели систем).

Схемы высокоточной ЛОС для контроля опорных поверхностей показана на рис. 8.68.

Пучок излучения, выходящий из лазера, поступает в коллиматор, состоящий из двух линз, одна из которых может перемещаться вдоль оси коллиматора. Затем пучок попадает в оптическую систему двойного изображения, которая содержит расщепитель пучка (разделяет пучок на два одинаковых пучка, расположенных под углом 45° к направлению расположения оси коллимации входящего в оптическую систему деления пучка излучения) и две призмы (установлены соответственно на пути каждого из двух пучков излучения, полученных после расщепителя, при этом ребро призмы 1' расположено в плоскости рисунка, а ребро призмы 2' перпендикулярно к плоскости рисунка).

Если ось коллимации совпадает с входной осью оптической системы, то оба пучка лазерного излучения выходят из нее, совпадая с выходной осью этой системы; если же ось коллимации не совпадает с входной осью оптической системы, то оба пучка лазерного излучения будут выходить из нее симметрично выходной оси. Это условие позволяет производить корректировку лазера с коллиматором для

исключения воздействия на ЛОС нестабильности оси лазера с течением времени.

В целом работа ЛОС производится в два этапа, на первом этапе устанавливают экран 5 в конце дистанции измерения и производят юстировку лазера совместно с коллиматором до момента появления пятна лазерного излучения на экране 5, добиваясь его наименьшего размера (по диаметру) при помощи подфокусировки коллиматора, т.е. перемещения линзы 9. На втором этапе устанавливают на выверяемой части объекта (поверхности станины) второй экран 6, производят перефокусировку пучка излучения и измерение. Контрольный экран 8 применяют для предварительного согласования оси коллимации с пучком лазерного излучения, а также для определения качества изображения пучка (отсутствует интерференция или нет). Используют в ЛОС гелий-неонового лазера мощность излучения 0,2 мВт, а также приемников вместо экранов 5, 6, 8, позволяет получить точность примерно 10 мкм на расстоянии 14 м.

Основное достоинство данной ЛОС – возможность контроля нестабильности положения оси лазера, что позволяет достигнуть высокой точности измерения. Однако система обладает и определенными недостатками:

- подвержена влиянию среды, в которой распространяется излучение (турбулентность);
- не позволяет в процессе измерения (установки экрана) постоянно производить компенсацию влияния нестабильности оси лазера;
- требует подфокусировки пучка излучения для каждого измерения (на разных расстояниях).

Эти факторы приводят как к ограничению точностных показателей ЛОС, так и уменьшают производительность проведения измерений.

Большое распространение за рубежом получила ЛОС для контроля непрямолинейности направляющих станков.

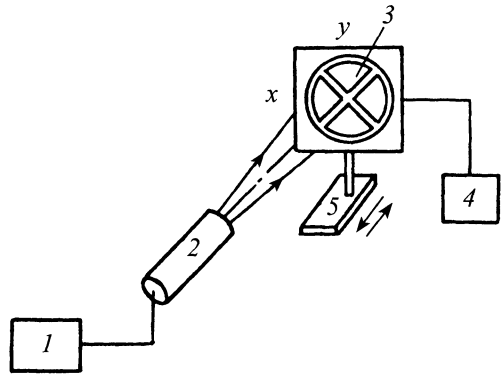


Рис. 8.69. ЛОС для контроля прямолинейных направляющих станков:
 1 – блок питания; 2 – лазер; 3 – позиционно-чувствительный элемент; 4 – блок индикации; 5 – ползун

Функциональная схема этой системы приведена на рис. 8.69. Несмотря на относительную простоту построения, этой ЛОС присущ ряд недостатков: влияние нестабильности оси лазера на работу системы, среды распространения, фоновых засветок (при больших уровнях освещенности).

Еще более высокую позиционную чувствительность обеспечивает ЛОС для выверки крупногабаритных конструкций. Селекция типов колебаний производится при помощи нанесения на одно из зеркал резонатора лазера двух тонких взаимно ортогональных полосок (линий), что обеспечивает устойчивую картину распределения поля в поперечном сечении пучка лазерного излучения в виде световых секторов, разделенных линиями нулевой интенсивности, и соответственно повышенную позиционную чувствительность (резкая граница свет–тень).

В соответствии с функциональной схемой ЛОС (рис. 8.70) пучок лазерного излучения, формируемый передатчиком, попадает на приемник, установленный на выверяемом объекте. Путем вращения опорных винтов производят юстировку объекта совместно с приемником относительно пучка лазерного излучения и по показаниям индикаторов электронной системы регистрации, соединенной с при-

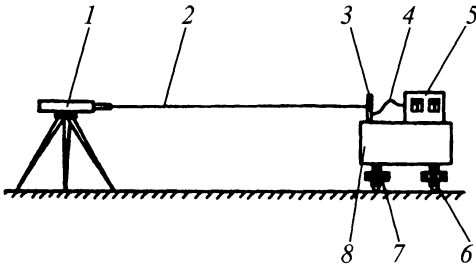


Рис. 8.70. ЛОС для выверки крупногабаритных конструкций:

- 1 – передатчик; 2 – пучок лазерного излучения; 3 – приемник; 4 – кабель; 5 – система регистрации; 6, 7 – опорные винты; 8 – выверяемый объект

емником электрическим кабелем, добиваются отсутствия сигналов рассогласования в системе регистрации. Наряду с высокой позиционной чувствительностью данная ЛОС обладает такими же недостатками, как и предыдущая.

Схема ЛОС с компенсацией влияния нестабильности оси лазера на ее точностные показатели показана на рис. 8.71. Система содержит излучатель гелий-неонового лазера мощностью излучения 1 мВт, который коаксиально укреплен в трубке, что позволяет производить последующую замену лазера и не приводит при этом к изменению положения оси пучка излучения; коллиматор из двух линз; диафрагму, установленную в месте перетяжки пучка в коллиматоре, которая и позволяет совместно с объективом 6 удерживать ось выходящего пучка в стабильном положении; оптическую систему, позволяющую изменять положение пучка лазерного излу-

чения в пространстве; визирную мишень, с помощью которой можно визуально наблюдать за ее перемещением (перемещением выверяемого объекта) относительно концентрических колец лазерного излучения, получаемых вследствие введения в пучок диафрагмы. ЛОС может работать и с фотоэлектрической регистрацией (с приемником), при этом достигаемая точность системы составляет 0,2 мм на расстоянии до 100 м.

К основным недостаткам данной ЛОС следует отнести дополнительные потери мощности излучения (дифракцию на отверстии), а также зависимость точности измерений от состояния среды распространения излучения (турбулентности) и фоновой освещенности (при большой внешней освещенности значительно уменьшается контраст, что затрудняет как визуальный, так и фотоэлектрический прием).

Способ точного задания опорного направления предусматривает построение ЛОС с учетом воздействия такого дестабилизирующего фактора как среда распространения, которая вызывает в общем случае искривление траектории распространения пучка лазерного излучения по сравнению с прямолинейным направлением. Сущность способа сводится к измерению расстояния между двумя компонентами (разными длинами волн) в месте приема (проведения измерений) и к последующему внесению поправки в приемное устройство.

Одной из типичных ЛОС, применяемых в судостроении, является лазерная

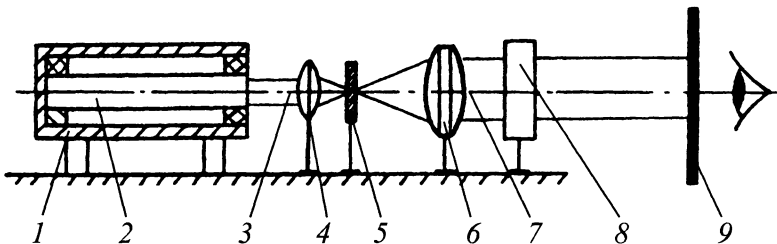


Рис. 8.71. ЛОС с компенсацией влияния нестабильности ОДН лазера:

- 1 – трубка; 2 – лазер; 3 – ось пучка излучения; 4, 6 – линзы коллиматора; 5 – диафрагма; 7 – ось выходящего пучка излучения; 8 – оптическая система; 9 – визирная мишень

система для измерения деформаций судна. На рис. 8.72 изображена схема функционального применения и построения такой ЛОС. В соответствии со схемой на рис. 8.72, *а* передатчик устанавливают в носовой части судна, а в кормовой части – приемник. В случае отсутствия деформации судна (т.е. до загрузки) ЛОС юстируется таким образом вдоль диаметральной плоскости судна, что сигналы рассогласования с приемника отсутствуют.

При деформации происходит взаимное перемещение частей судна, что приводит к изменению угла падения пучка лазерного излучения относительно оси приемника и соответственно к появлению сигналов рассогласования. При функциональной схеме построения ЛОС (рис. 8.72, *б*) пучок излучения, формируемый передатчиком, после трансформации его в коллиматоре попадает во входную апертуру приемника и, в частности, на отражающую гипотенузную грань уголкового призмы. Призма имеет возможность вращения совместно с валом вокруг его оси, а ее гипотенузная грань установлена под углом 45° к оси падающего пучка излучения. Вдоль оси вращения расположены фоточувствительные датчики, перпендикулярной направлению распространения излучения. При совпадении оси вращения уголкового призмы с осью пучка лазерного излучения отраженный от нее пучок формирует в пространстве световую плоскость, перпендикулярную оси пучка излучения, выходящего из передатчика *1*. Время прохождения пучком лазерного излучения расстояния между смежными датчиками одинаково, следовательно, сигнал рассогласования отсутствует, в случае же углового смещения приемника время различное, следовательно, возникает сигнал рассогласования.

Одной из важнейших технологических задач судостроения является взаимное центрирование и юстировка отдельных элементов конструкций. В соответствии со схемой на рис. 8.73 пучок лазерного излучения, выходящий из передатчика,

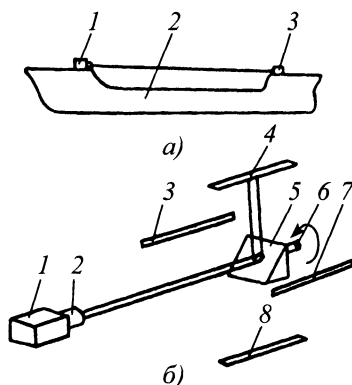


Рис. 8.72. ЛОС для измерений деформаций судна:

- а* – схема функционального применения;
- 1* – передатчик; *2* – судно; *3* – приемник;
- б* – схема функционального построения;
- 1* – передатчик; *2* – коллиматор;
- 3, 4, 7, 8* – фоточувствительные датчики;
- 5* – уголкового призмы; *6* – вал

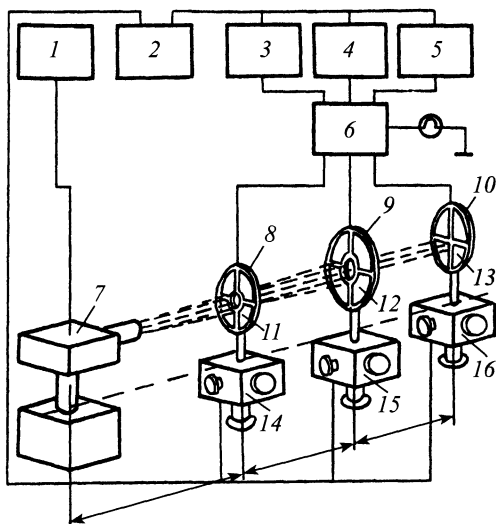


Рис. 8.73. ЛОС для центрирования и юстировки:

- 1* – блок питания; *2* – усилитель мощности;
- 3-5* – системы автоматического управления сервоприводами; *6* – сравнивающая система;
- 7* – передатчик; *8-10* – приемники;
- 11-13* – фотопреобразующие элементы приемников; *14-16* – автоматические системы

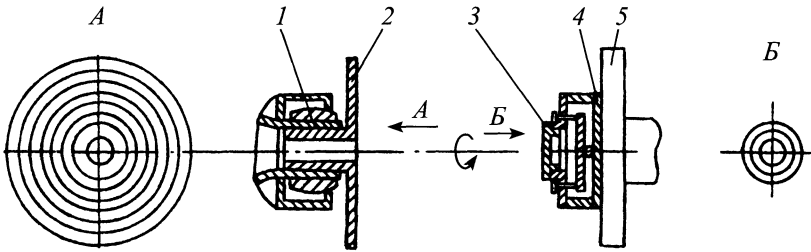


Рис. 8.74. Устройство для центрирования и монтажа главных энергетических установок судов:

1 – сферическая опора; 2 – контрольная мишень; 3 – заглушка; 4 – зеркальная мишень; 5 – фланец базового механизма

последовательно попадает на приемники. Фотопреобразующие элементы приемников представляют собой сегменты, сгруппированные в квадрантные датчики, с тем отличием, что приемники 8 и 9 имеют в центре различающиеся друг от друга по диаметру отверстия. При установке приемников на одной оси, совпадающей с энергетической осью пучка лазерного излучения, каждый из четырех фотопреобразующих сегментов приемников засвечен одинаково, что обеспечивает отсутствие сигналов рассогласования в электронной сравнивающей системе. При нарушении этого условия в системе *б* возникают сигналы рассогласования, которые поступают в электронные системы автоматического управления сервоприводами и через усилитель мощности приводят автоматические системы в действие. Системы 14 ... 16 перемещают приемники до момента отсутствия сигналов рассогласования, снимаемых с фотопреобразующих сегментов. В качестве источника излучения в ЛОС использован гелий-неоновый лазер мощностью излучения 1 мВт ($\lambda = 0,63$ мкм). Это обеспечивает точность автоматической выверки элементов относительно пучка лазерного излучения 0,25 мм на расстоянии 30 м.

Основными недостатками системы являются:

– влияние нестабильности оси лазера, что приводит к неустойчивой работе сис-

темы в целом или к появлению погрешности выверки;

– чувствительность системы к влиянию посторонних фоновых засветок на фотопреобразующие элементы системы и, как следствие, возникновение ложной информации о положении выверяемых объектов относительно эталонного положения, т.е. энергетической оси пучка лазерного излучения.

Схема ЛОС для центрирования и монтажа главных энергетических установок судов показана на рис. 8.74. Источником излучения в устройстве является гелий-неоновый лазер мощностью 0,3 мВт.

На сферической опоре лазерного устройства закрепляют контрольную мишень с рядом концентрических окружностей, теоретическую ось центровки задают пучком лазерного излучения. На фланце базового механизма устанавливают специальную зеркальную мишень с заглушкой, на которую также нанесен ряд концентрических окружностей, симметричных относительно центра мишени. Проворачивая вал базового механизма, смещают зеркальную мишень до совмещения окружности, описываемой лазерным пучком на заглушке, с одной из ее окружностей. При этом положении центр зеркальной мишени совмещен с осью вращения механизма. Центровку базового механизма осуществляют, перемещая его с помощью отжимных болтов до совмещения проекции лазерного пучка с центром заглушки.

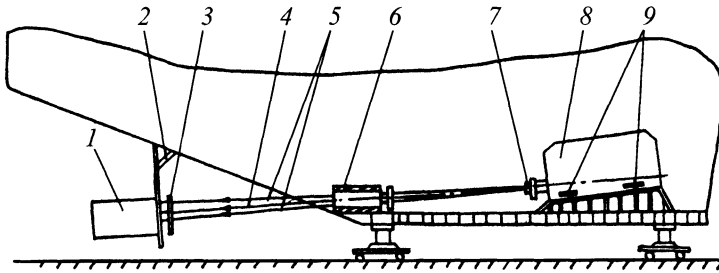


Рис. 8.75. Центровка главного двигателя:

- 1 – лазер; 2 – шерген; 3 – контрольная мишень; 4 – световая ось линии валопровода;
5 – отраженный луч лазера; 6 – дейдвудное устройство; 7 – зеркальная мишень;
8 – главный двигатель; 9 – отжимные болты

С помощью устройства можно производить центровку главного двигателя судна, монтаж подшипников, кронштейнов и дейдвудного устройства, центровку макет-кондукторов двигателей и редукторов.

Например, центровка главного двигателя осуществляется по схеме рис. 8.75. Лазерное устройство размещают на шергене в кормовой части судна и предварительно пробивают световую ось линии валопровода, относительно которой производится центровка двигателя. Контрольную мишень в зависимости от длины линии валопровода размещают либо на сферической опоре устройства, либо на одной из промежуточных опор. Дальнейшие работы ведутся по описанной выше схеме.

Для уменьшения угловой расходимости пучка лазерного излучения и получения на расстоянии 2 ... 40 м диаметра светового пятна 0,5 ... 2,5 мм используется зрительная труба от нивелира Н-2. Все измерения положения контролируемого объекта ведутся непосредственно от видимого лазерного луча или его проекции на мишень – светового пятна. Устройство также может быть применено для пробивки световой оси линии валопровода, установки и проверки положения фундаментов главных механизмов, опорных подшипников, мортир, кронштейнов гребных валов и т.д. К недостаткам данного устройства можно отнести влияние как среды распространения на проведение измерений, так и нестабильности оси лазера с течением времени.

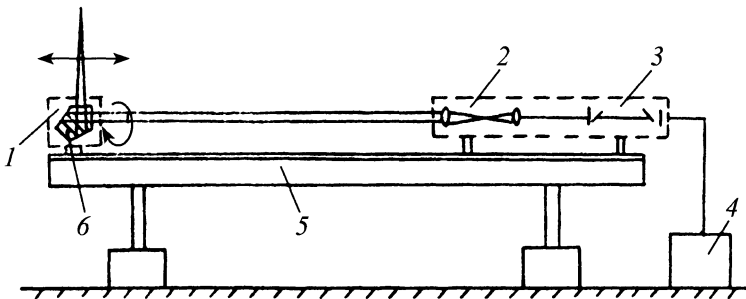


Рис. 8.76. ЛОС для разметки элементов корпусов при сборке:

- 1 – оптический блок; 2 – длиннофокусная оптическая система; 3 – лазер; 4 – блок питания;
5 – направляющая балка; 6 – пентапризма

ЛОС для разметки элементов корпусов при сборке (рис. 8.76) состоит из передатчика, включающего лазер (гелий-неоновый лазер типа ЛГ-55), длиннофокусную оптическую систему и блок питания. Передатчик закреплен неподвижно на конце направляющей балки длиной 4200 мм, а оптический блок отклонения пучка лазерного излучения может перемещаться вдоль нее. Сфокусированный пучок лазерного излучения, попадая в оптический блок, содержащий, например, пентапризму, отклоняется в нем на угол 90° относительно пучка лазерного излучения, выходящего из передатчика. Вращение пентапризмы вокруг оси падающего в нее пучка лазерного излучения, а также перестановка оптического блока вдоль направляющей балки позволяют формировать в пространстве ряд параллельных световых плоскостей, перпендикулярных к оси пучка лазерного излучения, выходящего из передатчика.

На рис. 8.77 приведена структурная схема разметки при помощи ЛОС днищевой секции кормовой оконечности судна. Установку направляющей балки относительно горизонта и линии ДП (диаметральной плоскости судна) производят, перемещая оптический блок относительно передатчика вдоль направляющей балки.

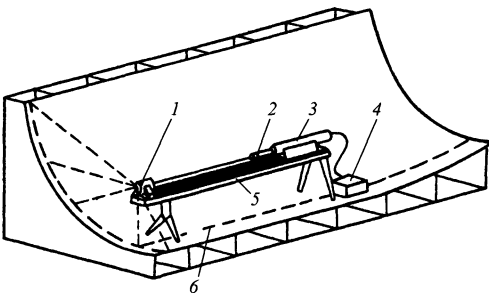


Рис. 8.77. Структурная схема разметки линий притыкания набора на криволинейных секциях:

1 – оптический блок; 2 – длиннофокусная оптическая система; 3 – передатчик; 4 – блок питания; 5 – направляющая балка; 6 – линия ДП (диаметральной плоскости судна)

Затем жестко укрепляют блок в требуемом месте разметки и, вращая пентапризму оптического блока, производят разметку точек, образующих линию притыкания шпангоута. Линия притыкания шпангоута в этом случае наносится на поверхность секции по световой проекции пучка лазерного излучения диаметром 1,5 ... 3 мм. Несмотря на удобство выполнения этой операции при помощи ЛОС данная ЛОС обладает рядом существенных недостатков, к ним, прежде всего, следует отнести:

- необходимость периодической проверки центровки передатчика и оптического блока, так как ввиду нестабильности оси лазера эта центровка будет нарушаться с течением времени;

- необходимость совмещения продольной оси, задаваемой ЛОС, с ДП судна путем перемещения в пространстве всей направляющей балки;

- ограничение диапазона работы ввиду ограниченности длины направляющей балки;

- отсутствие приемника лазерного излучения.

Указанные факторы в общем случае приводят соответственно к погрешности разметки, неудобству эксплуатации, потере производительности труда, снижению объективности и точности разметки.

На рис. 8.78 схематично изображен процесс проведения пробивки световой оси валопровода при помощи ЛОС. Предварительное совмещение оси пучка лазерного излучения с плазовыми точками А и А', нанесенными на кормовом и носовом шергнях, производят путем корректировки в пространстве передатчика ЛОС.

Последовательно устанавливают в промежуточных опорах мишени и производят их центрирование относительно пучка лазерного излучения. Линия, проходящая через центры мишеней, является геометрической осью валопровода. Передатчик этой ЛОС аналогичен передатчику ЛОС для разметки притыкания набора на криволинейных секциях, однако, если в

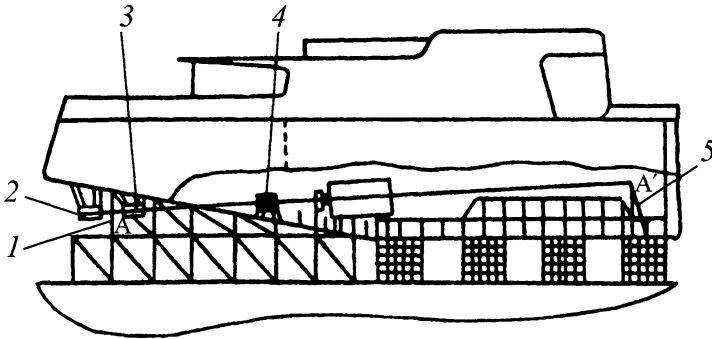


Рис. 8.78. ЛОС для пробивки световой оси валопровода:

1 – кормовой штергель; 2 – передатчик; 3, 4 – промежуточные опоры; 5 – носовой штергель

первом случае (разметка) ЛОС содержит оптический блок, то во втором (пробивка) – мишени, позволяющие оператору производить их центрирование, наблюдая визуально совмещение геометрического центра мишени с центром проекции пучка лазерного излучения. Достоинство этой ЛОС в простоте ее построения. К недостаткам системы следует отнести:

- влияние нестабильности оси лазера на результат измерений;
- наличие ошибки перефокусировки оптической системы;
- отсутствие приемника с фотоэлектрической регистрацией.

Эти факторы приводят как к ограничению точности ЛОС ($\pm 0,5$ мм на 18 м), так и к сужению ее функциональных возможностей при сходных технологических операциях, например, при центровке главного двигателя по теоретической оси валопровода, где необходимо иметь большую точность (0,2 мм) и возможность съема информации в месте расположения двигателя.

Схема универсальной ЛОС для поворотно-разметочных работ в судостроении – лазерный разметчик ЛАР-1 – представлена на рис. 8.79. Он содержит источник излучения – лазер ЛГ-66, оптический блок с механизмами настройки и две поворотные головки оптического блока: рабочую – относительно оптической оси

устройства и контрольную – относительно перпендикулярной к ней оси.

Пучок лазерного излучения после коллиматора телескопического типа выходит сформированный до необходимых геометрических параметров и попадает на рабочую пентапризму, откуда выходит перпендикулярно к оптической оси устройства. При повороте рабочей головки оптического блока лазерный луч образует плоскость I. При этом контрольная пентапризма занимает исходное положение. При рабочем положении контрольной пентапризмы лазерный луч выходит из нее в качестве контрольного и при повороте

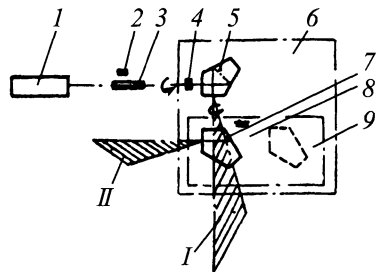


Рис. 8.79. Лазерный разметчик ЛАР-1:

1 – лазер; 2, 4, 8 – цилиндрические уровни; 3 – коллиматор; 5 – рабочая пентапризма; 6 – рабочая головка; 7 – контрольная пентапризма; 9 – контрольная головка; I – плоскость, создаваемая рабочим лучом; II – плоскость, создаваемая контрольным лучом

контрольной головки оптического блока образует плоскость II , перпендикулярную к плоскости I . С помощью системы цилиндрических уровней и механизма настройки осуществляется необходимая ориентация этих плоскостей в пространстве, в комплект прибора входит унифицированный штатив.

С помощью ЛАР-1 можно осуществлять целый ряд поверочно-разметочных работ в судостроении: построение базовых линий на стапеле, контуровке монтажных стыков корпусных конструкций, проверку положения корпусных конструкций на стапеле относительно базовых плоскостей, разметку полотнищ секций под установку набора.

Построение базовых линий на стапеле осуществляется по следующей типовой схеме. Лазерный разметчик на штативе устанавливают над одной из крайних планок базовой плоскости стапеля с помощью механизма настройки. По уровню 2 (см. рис. 8.79) устанавливают оптический блок горизонтально, а плоскость II по уровню 4 – вертикально, затем по двум крайним точкам совмещают ее с базовой. Поворотом контрольной головки сканируют луч на промежуточные планки стапеля и фиксируют на них положение базовой плоскости. Для нанесения перпендикуляров контрольную пентапризму выводят в исходное положение и поворотом рабочей головки наносят на планках стапеля первый перпендикуляр. Переставляя вдоль базовой линии устройство, наносят последующие перпендикулярные линии стапеля.

Для нанесения горизонтальной плоскости поворотом рабочей головки по уровню 8 выводят плоскость II в горизонтальное положение и поворотом контрольной головки на вертикальных планках стапеля наносят следы горизонтальной плоскости.

Разметку полотнищ секций под установку набора выполняют аналогичным образом. В случае несложных конструкций эту операцию можно значительно ускорить, отсоединив устройство от штатива и разместив его на каретке, перемещаю-

щейся по направляющей инструментальной балки. Инструментальную балку размещают на размечаемой конструкции или подвешивают с возможностью ее перемещения. В первом случае после разметки 8–10 теоретических шпаций требуются перестановка инструментальной балки и привязка направляющих к базовым плоскостям, при этом даже небольшая кривизна конструкции значительно усложняет процесс перестановки. Во втором случае процесс перемещения инструментальной балки значительно упрощен и не зависит от кривизны размечаемой конструкции. Упрощена также привязка устройства к базовым плоскостям размечаемой конструкции.

Описанный метод разметки имеет существенный недостаток, так как наряду с присущей ЛОС нестабильностью положения оси лазера в пространстве с течением времени, оказывающей влияние на точность производимых работ, требуется высокая точность изготовления инструментальной балки, для которой необходима разработка условий ее использования и хранения. Для устранения этого недостатка возникает необходимость при разметке полотнищ и секций под установку набора с помощью ЛАР-1 на стадии проектирования сборочных постелей и стендов предусматривать в их конструкции простейшие направляющие с перемещающимися по ним каретками для установки лазерного устройства ЛАР-1. Этот способ разметки прост, удобен для разметчиков, эффективен (по сравнению с существующими средствами разметки повышает производительность труда в 3–6 раз), но требует не всегда обоснованного усложнения конструкции сборочной постели и стенда, т.е. применение устройства без предварительной подготовки соответствующей оснастки невозможно.

ЛОС можно использовать для замены танка, подвергшегося сильной коррозии. Танкер помещали в сухой док, разрежали на три части и вновь монтировали уже с новым танком. ЛОС была использована

для установления линии резания и контроля движения корпуса судна в процессе резания. Наиболее ответственная операция при этом – определение линий резания на корпусе судна (задание параллельных плоскостей резания, перпендикулярных ДП судна). ЛОС содержит оптическую головку, которую можно конструктивно соединять с передатчиком или использовать без направляющей балки. Ввиду того, что при резании большого корпуса происходит смещение судна в спусковых салазках, получение ровного шва можно компенсировать, имея информацию об изменениях (деформациях) в корпусе судна в процессе резания. Для выполнения этой задачи передатчик ЛОС устанавливали на специальном столике, прикрепляемом к спусковым салазкам судна, и по всей длине судна измеряли расстояния от поверхности корпуса судна до пучка лазерного излучения при помощи обыкновенной линейки.

ЛОС возможно применять для контроля сложных кинематических структур судов на подводных крыльях и воздушной подушке. На рис. 8.80 изображена схема центровки энергетической установки судна на подводных крыльях при помощи ЛОС. В соответствии с этой схемой разметка и задание в пространстве осей производятся при помощи лазера, ряда оптических отклоняющих элементов, а также приемников ЛОС. Методика контроля отдельных элементов энергетической установки в соответствии со схемой, а также высокие точностные требования к ЛОС указывают на основные недостатки ЛОС, сдерживающие ее применение: влияние нестабильности оси лазера, среды распространения (турбулентности), высокие требования к изготовлению оптических элементов, повышенные требования к стабильности параметров и помехозащищенности приемников.

Рассмотренные в данной главе ЛОС для судостроения имеют различное функциональное построение, требующее для

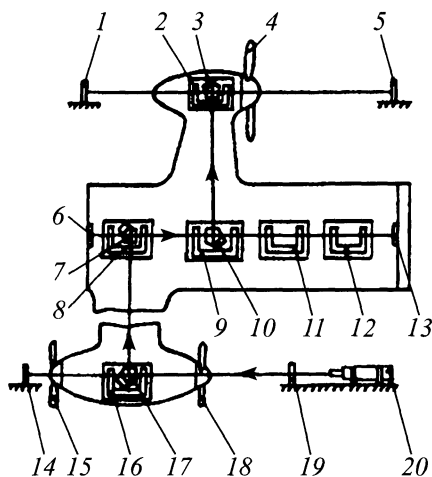


Рис. 8.80. ЛОС для контроля сложных кинематических структур судов на подводных крыльях:

1, 5, 6, 13, 14, 19 – приемники; 2 – МК редуктора воздушного винта; 3, 7, 10, 17 – пентапризмы; 4 – воздушный винт; 8 – МК углового редуктора; 9 – МК раздаточного редуктора; 11 – МК редуктора; 12 – МК главного двигателя; 15, 18 – гребные винты; 16 – МК нижнего редуктора; 20 – лазер; МК – макет-кондуктор

своего воплощения индивидуального конструктивного исполнения. Все эти ЛОС не исключают воздействия на их функционирование и технические характеристики основных дестабилизирующих факторов, таких, как нестабильность оси лазера, влияние среды распространения, фоновых засветок при больших уровнях внешней освещенности.

8.6. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

8.6.1. Контроль полупроводниковых материалов

Определение концентрации носителей по плазменному резонансу. Метод плазменного резонанса используется для измерения концентрации свободных носителей в сильнолегированных объемных полупроводниках и эпитаксиальных слоях. Метод основан на известном явлении плазменного резонанса, возникающем при

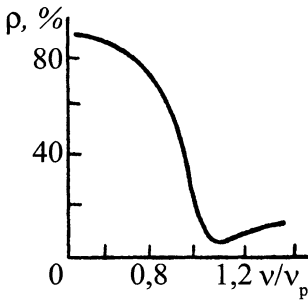


Рис. 8.81. Зависимость коэффициента отражения полупроводника от частоты ν падающего излучения

поглощению электромагнитного излучения на свободных носителях заряда.

Спектральная зависимость коэффициента отражения имеет вид, показанный на рис. 8.81. Наблюдаемый минимум и последующее резкое возрастание коэффициента отражения происходят вблизи некоторой характерной точки, соответствующей частоте собственных колебаний электронной плазмы. При частоте ν_p происходит резонансное поглощение излучения на колебаниях электронной плазмы, поэтому этот эффект и получил название плазменного резонанса. Спектральное положение λ_{\min} минимума функции $\rho(\lambda)$ зависит от концентрации свободных носителей N .

Измеряя спектральную зависимость коэффициента отражения исследуемого полупроводника, по положению минимума этой зависимости можно определить концентрацию свободных носителей.

Определение концентрации по оптическому поглощению. Метод широко используется для измерения сильно легированных полупроводников и основан на явлении поглощения света свободными носителями заряда.

Коэффициенты пропускания τ и отражения ρ образца толщиной d описываются следующими соотношениями:

$$\tau = \frac{(1 - \rho_0)^2 e^{-\alpha d}}{1 - \rho_0^2 e^{-2\alpha d}}; \quad \rho = \rho_0(1 + \tau e^{-\alpha d}),$$

где ρ_0 – коэффициент отражения для полубесконечного образца; α – коэффициент поглощения, связанный с оптическими постоянными материала формулой $\alpha = 4\pi K/\lambda$ (K – коэффициент экстинкции; λ – длина волны). Значение α зависит от концентрации свободных носителей.

Измеряя экспериментально коэффициенты пропускания τ и отражения ρ исследуемого образца, определяют коэффициент поглощения α и, пользуясь известной функцией $\alpha(N)$, получают искомую концентрацию свободных носителей. Теоретическая модель поглощения света свободными носителями заряда разработана еще недостаточно полно, поэтому между теорией и экспериментом наблюдаются расхождения, особенно сильные в области больших длин волн. В коротковолновом участке инфракрасной области спектра экспериментальная зависимость $\alpha(N)$ хорошо согласуется с теоретической. Учитывая указанное выше, функцию $\alpha(N)$ обычно находят экспериментально, измеряя α на калибровочных образцах с известным значением N .

Для измерения коэффициента поглощения выбирают спектральный диапазон в области фундаментального поглощения исследуемого полупроводника. При этом надо учитывать, что поглощение света может происходить не только свободными носителями. В определенных участках спектра интенсивно проявляются поглощение фононами и характеристические полосы примесного поглощения. Это приведет к ошибкам в определении концентрации носителей тока по измеренному значению α . Чтобы избежать подобных ошибок, рабочую длину волны следует выбирать в том участке спектра, где другие механизмы поглощения проявляются наименее интенсивно.

В кремнии, например, фононная полоса поглощения света занимает широкий спектральный диапазон 6 ... 40 мкм. Коэффициент фононного поглощения изменяется на этом участке спектра в пределах

0,3 ... 10 см⁻¹ и для концентраций носителей заряда $N < 10^{18}$ см⁻³ становится сравнимым по порядку значения с коэффициентом поглощения на свободных носителях. Поэтому при измерениях в этом диапазоне длин волн в определяемое значение N будет вноситься большая ошибка. Чтобы исключить эту ошибку, целесообразно рабочую длину волны для кремния выбирать $\lambda < 5$ мкм либо $\lambda > 40$ мкм. При этом для концентраций $N > 10^{18}$ см⁻³ целесообразнее использовать коротковолновый диапазон, так как коэффициент поглощения свободными носителями в этой области спектра достаточно велик и техника эксперимента не вызывает особых затруднений, позволяя использовать нестандартную аппаратуру.

Определение концентрации по эффекту Фарадея. Эффектом Фарадея называют физическое явление, заключающееся в повороте плоскости поляризации электромагнитного излучения при прохождении его через полупроводник в магнитном поле, ориентированном вдоль направления распространения луча. Когда плоскополяризованная волна с произвольным направлением плоскости поляризации попадает в некоторую среду, она разлагается на две циркулярно поляризованные волны с правым и левым направлением вращения. Если скорости распространения этих двух волн различны, то при прохождении через среду они приобретут некоторую разность фаз.

Сложение на выходе из среды двух циркулярно поляризованных колебаний, отличающихся по фазе на величину φ , дает снова линейно-поляризованную волну, но с плоскостью поляризации, повернутой на угол $\varphi/2$ к электрическому вектору падающей волны.

Таким образом, происхождение эффекта Фарадея обусловлено стимулированной магнитным полем дисперсией показателя преломления полупроводника относительно направления вращения электрического вектора циркулярно поляризованной волны. Угол поворота плоскости поляризации при прохождении излу-

чения через среду толщиной d равен

$$\theta = \varphi/2 = \pi d/\lambda(n_2 - n_1),$$

где n_1, n_2 – показатели преломления соответственно для левого и правого вращения.

Дисперсия показателя преломления возникает вследствие различной вероятности переходов электронов между энергетическими уровнями под действием электромагнитного излучения с противоположными направлениями круговой поляризации в присутствии магнитного поля, перпендикулярного к плоскости вращения электрического вектора волны. Энергетические переходы возможны как между уровнями валентной зоны и зоны проводимости, так и между уровнями внутри зоны проводимости. Поэтому различают межзонный эффект Фарадея и эффект Фарадея на свободных носителях.

Межзонное фарадеевское вращение интенсивно проявляется на длинах волн, при которых энергия кванта близка к ширине запрещенной зоны полупроводника. С ростом длины волны этот эффект затухает и более интенсивно начинает проявляться фарадеевское вращение на свободных носителях. Это обстоятельство и используется для измерения концентрации носителей тока.

Определение концентрации глубоких доноров (акцепторов) по эффекту Холла. При высоких температурах, примесные уровни мелких доноров и акцепторов полностью опустошаются и концентрация электронов и дырок перестает зависеть от температуры вплоть до тех температур, при которых начинает иметь преобладающее влияние собственная проводимость, обусловленная тепловым забросом электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Однако, если в полупроводнике, например *n*-проводимости, кроме мелких доноров есть донорные примеси, образующие глубокие энергетические уровни, то с повышением температуры (за пределы истощения мелких донорных уровней)

концентрация электронов начинает возрастать вследствие ионизации уровней глубоких доноров. Из анализа температурной зависимости концентрации электронов в этом температурном интервале можно определить концентрацию глубоких доноров и их энергию ионизации. Если в полупроводнике *n*-типа глубокие доноры образуют один энергетический уровень $E_{г.д.}$, то в температурном интервале, где мелкие доноры полностью истощены, концентрация электронов *n* будет связана с концентрацией глубоких доноров $N_{г.д.}$ следующим уравнением:

$$\frac{n_1(N_d + n_1)}{N_{г.д.} - N_a - n_1} = \frac{1}{\gamma_{г.д.}} N_c \exp\left(-\frac{E_{г.д.}}{kT}\right),$$

где N_a , N_d , $N_{г.д.}$ – соответственно концентрация акцепторов, доноров и глубоких доноров; n_1 – избыточная концентрация электронов по отношению к $n = N_d - N_a$, соответствующего истощению мелких донорных уровней; $E_{г.д.}$ – энергия глубоких доноров; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Подбором параметров, входящих в уравнение, добиваются наилучшего соответствия экспериментальной и теоретической кривых. Отсюда определяются неизвестные значения $N_{г.д.}$ и $E_{г.д.}$. Если в полупроводнике содержатся глубокие доноры, образующие несколько энергетических уровней, отличающихся друг от друга более чем на kT , для определения их концен-

трации и энергетического положения можно приписать величины $N_{г.д.}$, $E_{г.д.}$, n_1 соответствующему донорному уровню.

Описанный метод широко используется для определения содержания и идентификации глубоких доноров и акцепторов в полупроводниках. Этот метод применен для исследования арсенида галлия, содержащего примесь кислорода.

Определение содержания и идентификация примесей по спектрам фотолюминесценции. Атомы примесей в полупроводниках могут служить эффективными центрами рекомбинации неравновесных носителей заряда. Если рекомбинация носит излучательный характер, то при захвате электрона или дырки на примесный уровень будет выделяться энергия в виде квантов света с энергией $h\nu$, соответствующей энергетическому положению примесного уровня относительно зоны проводимости или валентной зоны.

Регистрация рекомбинационного излучения проводится на специальных приборах, устройство которых показано на рис. 8.82. Исследуемый образец освещается лучом света от источника излучения с большой интенсивностью, необходимой для возбуждения в полупроводнике высокой концентрации неравновесных пар носителей. В качестве источника света обычно используются мощные ртутные лампы или оптические квантовые генераторы с длиной волны, находящейся в

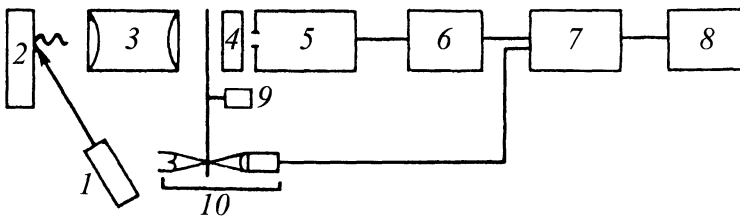


Рис. 8.82. Схема измерения спектров фотолюминесценции:

- 1 – источник возбуждения; 2 – образец; 3 – коллиimator; 4 – фильтр; 5 – монохроматор;
- 6 – усилитель; 7 – синхродетектор; 8 – самописец; 9 – модулятор; 10 – датчик опорного напряжения

спектральном интервале фундаментально-го поглощения исследуемого полупроводника. Рекомбинационное излучение от образца с помощью коллиматора фокусируется на щель монохроматора. Распределение интенсивности в спектре исследуемого излучения регистрируется фотоприемником. Чтобы луч света от источника возбуждения не попадал в монохроматор, перед его входной щелью устанавливается фильтр с соответствующей полосой пропускания. Для получения большего отношения сигнал/шум на выходе измерительного тракта применяют схему синхронного детектирования.

По длине волны максимума наблюдаемой примесной полосы излучения определяется энергетическое положение центра рекомбинации и принадлежность его к определенному типу примесных атомов, если заранее известна энергия создаваемых ими уровней. Информация о количественном содержании примесных атомов получается из измерений интенсивности соответствующей примесной полосы излучения.

Определение концентрации оптически активных примесей по спектрам характеристического поглощения. Примесные атомы в твердом теле вызывают появление в фоновом спектре кристаллической решетки дополнительных колебательных частот, обусловленных локальным взаимодействием примесного центра с окружающими его соседними атомами. Частота и интенсивность резонансных колебательных мод примесного атома зависят от его положения в кристаллической решетке и сил упругой связи с ближайшими соседями.

Под воздействием электромагнитного излучения колебательные моды примесных атомов могут возбуждаться и в спектре пропускания появятся полосы резонансного поглощения. По спектральному положению этих полос поглощения можно определить природу примесного центра, а по интенсивности этих полос оценить концентрацию примесных атомов.

Таким образом, для определения концентрации исследуемой примеси необходимо измерить спектр пропускания полупроводника и подсчитать площадь пика поглощения, соответствующего данной примеси.

Исследование инородных включений по оптическому рассеянию. Вследствие распада пересыщенных твердых растворов и ряда других причин в объеме полупроводникового кристалла могут образовываться выделения второй фазы. Эти частицы оказывают сильное влияние на характеристики полупроводниковых приборов, вызывая появление токов утечки $p-n$ -переходов, снижая их пробивные напряжения. Кроме того, частицы второй фазы стимулируют образование в кристаллической решетке других структурных дефектов (например, дислокаций), которые также ухудшают обратные характеристики $p-n$ -переходов и изменяют пластические свойства материала.

Поэтому возникает необходимость контролировать полупроводниковые материалы на наличие в них выделений второй фазы. Если частицы второй фазы имеют показатель преломления, отличный от показателя преломления основного вещества, то проходящий через кристалл свет будет рассеиваться на этих частицах.

Экспериментально рассеяние света обнаруживается по дополнительному поглощению, которое количественно может быть описано коэффициентом поглощения $\alpha_p = N_p A Q_p$, где N_p – концентрация рассеивающих частиц; A – теневая площадь частицы в направлении падающего света, Q_p – фактор эффективности рассеяния.

Значение Q_p зависит от формы, геометрических размеров частиц и их ориентации относительно направления распространения луча. Наиболее простая и ясная физическая интерпретация формул для оптического рассеяния имеет место в некоторых частных случаях.

Эти формулы позволяют производить количественную оценку геометрических

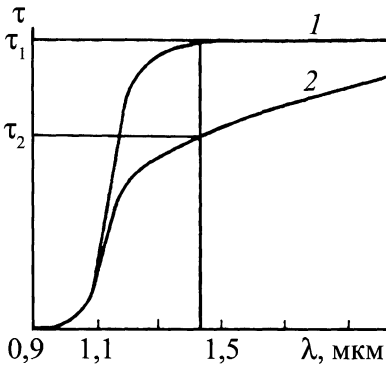


Рис. 8.83. Кривые пропускания кремния вблизи края фундаментального поглощения при наличии (2) и отсутствии (1) рассеивающих частиц SiO₂

размеров и концентрации частиц, а по зависимости коэффициента поглощения α_p от длины волны определять их форму.

Так как интенсивность рассеянного света резко падает с увеличением длины волны, то удобнее рассеяние света на частицах второй фазы наблюдать вблизи края фундаментального поглощения исследуемого полупроводника. Оптическое рассеяние приводит к более пологой зависимости пропускания от длины волны в этом участке спектра. На рис. 8.83 показан характерный вид кривых пропускания кремния без рассеивающих свет частиц и с рассеивающими частицами SiO₂, возникающими при осаждении избыточной концентрации кислорода.

Сущность другого метода показана на рис. 8.84. Источник света помещается в интегральную сферу, имеющую два соос-

ных отверстия. К одному из них, имеющему больший диаметр, примыкает абсолютно черное тело. Свет от источника после многократного отражения внутри сферы выходит наружу через отверстие малого диаметра. Так как лучи света, попадающие в противоположное отверстие, поглощаются АЧТ, на выходе из сферы образуется затемненный конус, в котором свет не распространяется. Если вплотную к выходному отверстию сферы поместить образец, в котором содержатся рассеивающие частицы, то затемненный конус заполняется рассеянным светом. С помощью оптической системы рассеянное излучение фокусируется на фотоприемник, помещенный в темный конус, и регистрируется измерительным прибором. Для выделения определенной длины волны рассеянного света используются фильтры с необходимой полосой пропускания. Для визуального наблюдения однородности рассеяния по площади образца рассеянное излучение может быть спроецировано на катод электронно-оптического преобразователя.

Описанный метод использовался для исследования процесса распада твердого раствора кислорода в кремнии, сопровождающегося образованием частиц SiO₂.

Выявление дефектов структуры методом декорирования. При изучении структуры полупроводниковых материалов широкое применение получили методы визуализации структурных дефектов путем их декорирования примесями. Сущ-

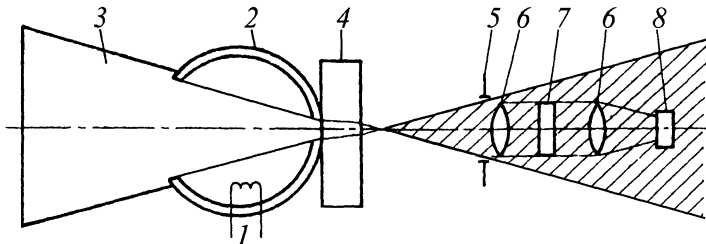


Рис. 8.84. Схема измерения оптического рассеяния:

- 1 – источник света; 2 – интегральная сфера; 3 – абсолютно черное тело; 4 – образец;
- 5 – диафрагма; 6 – оптическая система; 7 – монохроматизирующий фильтр;
- 8 – фотоприемник

ность эффекта декорирования заключается в следующем. Известно, что под действием локальных упругих полей, возникающих вокруг структурных несовершенств кристаллической решетки, примесные атомы концентрируются преимущественно вблизи дефектов структуры, образуя на них так называемую примесную атмосферу. Если примесь вводится в исследуемый образец при высокой температуре, когда растворимость ее в кристаллической решетке велика, при охлаждении твердый раствор примеси в кристалле становится пересыщенным и возникает процесс осаждения избыточных примесных атомов с образованием частиц второй фазы. Этот процесс наиболее интенсивно протекает вблизи дефектов структуры, так как примесная атмосфера вокруг них приводит к более сильному пересыщению твердого раствора декорирующей примеси и возникновению частиц второй фазы в этих областях кристалла становится энергетически более выгодным.

В инфракрасном свете, для которого основной объем полупроводника прозрачен, примесная атмосфера с выделениями частиц второй фазы вызывает локальное увеличение коэффициента поглощения инфракрасного излучения. В результате этого в инфракрасном микроскопе будет наблюдаться контрастное изображение структурного дефекта.

Впервые метод декорирования был использован для наблюдения дислокаций в кремнии. Декорирование проводилось примесью меди. Для этого исследуемые образцы смачивались в растворе $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, после чего отжигались примерно в течение часа в атмосфере водорода при $900\text{ }^\circ\text{C}$. После отжига образцы извлекались из печи и охлаждались до комнатной температуры в течение нескольких минут. На практике диффузию меди в кремний с целью декорирования дефектов структуры проводят в более широком диапазоне температур $900 \dots 1200\text{ }^\circ\text{C}$. Длительность диффузии выбирают такой, чтобы диф-

фундирующая медь равномерно распределялась по объему кристалла.

8.6.2. Контроль дефектов поверхности пластин

Контроль указанных дефектов поверхности можно осуществить, освещая поверхность параллельным или расходящимся лучом лазера и анализируя картину отражения лучей от полированной поверхности.

Принципиальная схема измерений показана на рис. 8.85. При контроле пластин больших размеров (рис. 8.85, *а*) луч от лазера 1 расширяется коллиматором 2, далее проходит через полупрозрачное зеркало 3 и, отражаясь от контролируемой пластины 4, лежащей на поглощающем основании 5, и полупрозрачного зеркала 3, попадает на экран 8. Для контроля пластин малых размеров используется схема, показанная на рис. 8.84, *б*. В этом случае коллиматор не применяется, а луч после отражения от контролируемой пластины 4 расширяется рассеивающей линзой 6 и зеркалом 7 отбрасывается на экран 8. В качестве экрана можно использовать матовое стекло, видоискатель фотоаппарата типа "Зенит" или фоточувствительную площадку видикона (в этом случае картину отраженной поверхности в сильно увеличенном виде можно наблюдать на экране видеоконтрольного устройства телевизионной установки).

При освещении полированных поверхностей когерентным светом изгибы, перекосы, неровности, возникающие при приготовлении пластин, отражают лучи под разными углами, что приводит к интерференции. Возникающая при этом сложная картина однозначно связана с рельефом поверхности. После небольшой практики может быть составлена картотека "образов", соответствующих характерным и повторяющимся дефектам.

Контроль изгибов предложенным методом целесообразен, если они достаточно большие (от нескольких десятков минут

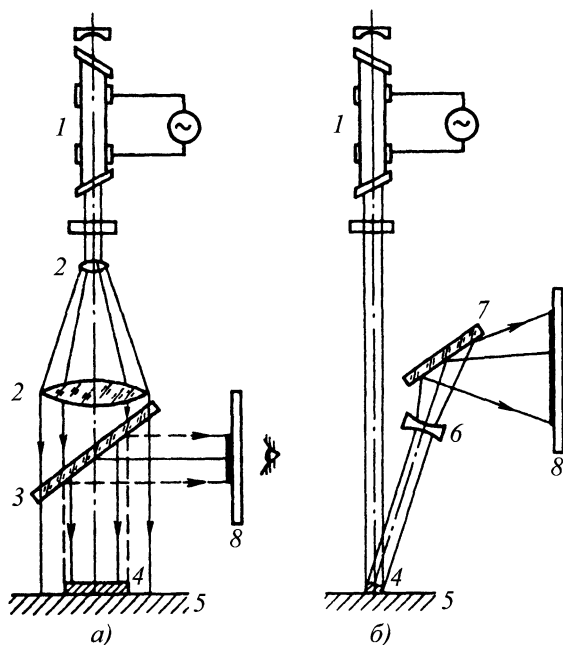


Рис. 8.85. Схема контроля качества полированных поверхностей по отражению лучей лазера:

а – схема для контроля пластин большого диаметра; *б* – схема для контроля кристаллов и полупроводниковых структур небольших размеров; 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3, 7 – зеркала; 4 – контролируемая пластина; 5 – поглощающее основание; 6 – линза

до нескольких градусов). Малые изгибы и отклонения от плоскости лучше контролировать интерференционным методом.

Рефлектометрический контроль качества полированной поверхности и толщин диэлектрических пленок. Интенсивность света, отраженного от полированной поверхности, зависит как от качества полировки, так и от наличия тонких диэлектрических прозрачных пленок на поверхности. Некачественная полировка может быть обнаружена способом, указанным в предыдущем разделе, по значительному фону, связанному с диффузным рассеянием. Что касается зеркального отражения, то наиболее чувствительным к качеству обработки поверхности является пик отражения кремния в области 0,28 мкм. В этом диапазоне длин волн глубина поглощения света не превышает

0,1 мкм, а процессы отражения определяются поверхностными слоями еще меньшей толщины. Механические напряжения, возникающие в нарушенном слое, приводят к деформации зонной структуры кремния, а это в свою очередь приводит к уменьшению пика отражения в области 0,28 мкм. Максимальное отражение при химической полировке составляет около 70 % и уменьшается до 50 ... 40 % при механической.

Таким образом, можно контролировать качество полировки поверхности. Для повышения точности целесообразно применять двухлучевую схему измерений. Рабочая длина волны 0,28 мкм выделяется из спектра водородной, дейтериевой или гелиевой лампы путем многократных отражений от стопки полированных пластин кремния, а также при использовании фо-

тоумножителя, имеющего максимум чувствительности в области 0,28 мкм.

Сравнивая коэффициенты отражения от подложки без покрытия и от подложки, покрытой тонкой прозрачной диэлектрической пленкой, можно при известном значении коэффициента преломления пленки определить ее толщину.

Интерференционный контроль плоскостности поверхности и равномерности толщины полупроводниковых пластин. Контроль плоскостности поверхности пластин можно производить при помощи лазерных интерферометров.

Оптическая схема телевизионного интерферометра показана на рис. 8.86. Монохроматический луч света от лазера 1 расширяется коллиматором 2, 3 и, проходя через полупрозрачное зеркало 4 и оптический эталонный клин 5, попадает на поверхность контролируемой пластины 6.

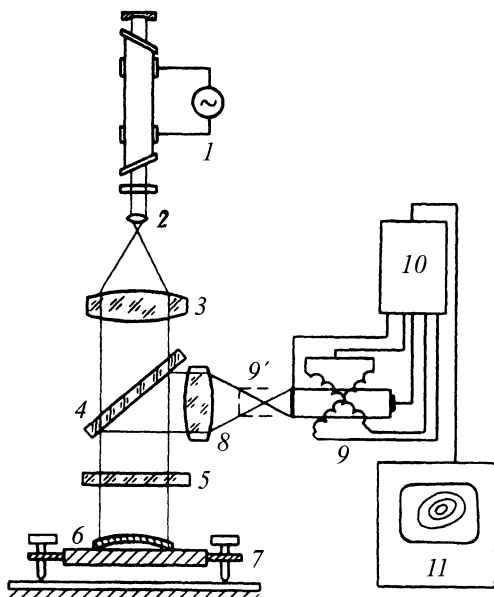


Рис. 8.86. Схема интерферометра:

- 1 - лазер; 2, 3 - коллиматор; 4 - зеркало;
5 - эталонный клин; 6 - контролируемая
пластина; 7 - юстировочные винты; 8 - линза;
9 - видикон; 10 - передатчик;
11 - телевизионное устройство

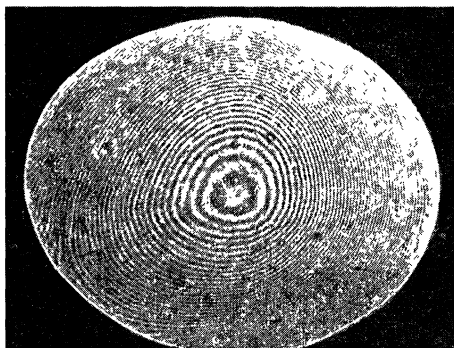


Рис. 8.87. Интерференционные кольца, соответствующие изгибу пластины кремния

На нижнюю поверхность оптического клина напылен полупрозрачный слой металла для увеличения коэффициента отражения и повышения контрастности интерференционной картины. Отраженный свет направляется полупрозрачным зеркалом 4 через линзу 8 на светочувствительную площадку видикона 9 телекамеры 10. Затем видеосигнал подается на экран контрольного телевизионного устройства 11.

На рис. 8.87 показан изгиб пластины кремния, одна сторона которой отполирована, а другая отшлифована порошком М10. Наблюдается примерно 50 колец, каждое кольцо соответствует $\lambda/2$, т.е. около 0,32 мкм, суммарный прогиб пластины равен примерно 16 мкм.

На рис. 8.88 показаны изменения прогиба одной из пластин кремния после различных технологических операций. Видно, оксид "стягивает" поверхность пластины, а шлифовка расширяет ее (эффект Тваймана): суммарное действие оксида на полированную сторону и влияние нарушенного слоя на шлифованной приводят к сильному прогибу пластины.

Измеряя прогиб под действием какого-либо покрытия (оксид, нитрид кремния, пленка металла или лака и т.п.), можно определить механические напряжения,



Рис. 8.88. Изменения стрелы прогиба пластины после различных технологических операций:

- 1 – исходная пластина; 2– двустороннее окисление; 3 – снятие оксида со шлифованной стороны; 4 – фотолитография; 5 – загонка бора; 6 – снятие боросиликатного стекла; 7 – разгонка бора; 8 – загонка фосфора

создаваемые покрытием на границе раздела. Расчет напряжений производят по формуле

$$\sigma = \frac{1}{4r} \frac{Eh}{(1-\mu)},$$

где E – модуль Юнга; h – толщина пластины; μ – коэффициент Пуассона; r – радиус изгиба за счет покрытия.

Равнотолщинность пластин кремния и арсенида галлия можно контролировать, используя то обстоятельство, что эти пластины являются прозрачными в ИК-области спектра. В этом случае, применяя монохроматический луч лазера, можно наблюдать интерференционную картину при помощи электронно-оптического преобразователя или видикона, чувствительного в ИК-области. Принципиальная схема интерферометра для контроля равнотолщинности показана на рис. 8.89. Измерения проводят на длине волны $\lambda = 1,15$ мкм. Коллимированный плоскопараллельный пучок света падает под углом 15° на пластину, расположенную на матовом или неотражающем основании. Вследствие высокого коэффициента преломления кремния и арсенида галлия преломленный луч распространяется почти нормально к поверхности.

Условия максимумов и минимумов интенсивности интерференционной картины, образуемой при отражении от передней и задней поверхностей пластины, имеют вид:

$$2dh = \frac{k\lambda}{2},$$

где d – толщина пластины; n – показатель преломления; λ – длина волны; k – порядок интерференции.

Величина k равна $2m$ для минимумов и $2m + 1$ для максимумов, где m – целое число. Так как интерференция происходит в сравнительно толстых пластинах, то величина $k\lambda$ обычно в 100 ... 500 раз больше длины волны. Расстояние между двумя соседними максимумами определяется разностью толщин d_1 и d_2 в соответствующих точках пластины, для которых справедливы соотношения

$$d_1 = \frac{2m\lambda}{4n}; d_2 = \frac{2(m+1)\lambda}{4n}; d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2n}.$$

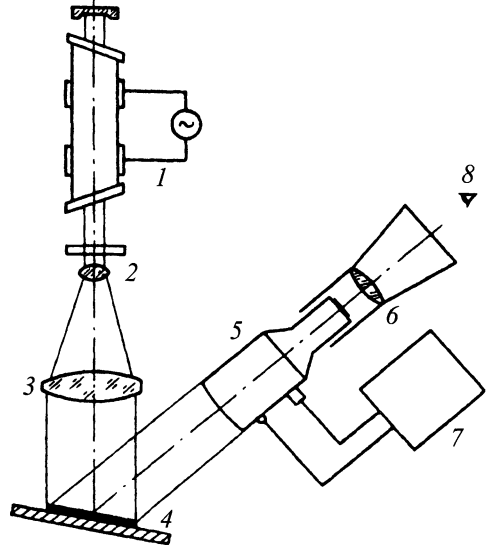


Рис. 8.89. Схема интерферометра для контроля равнотолщинности полупроводниковых пластин:

- 1 – лазер ЛГ-126; 2, 3 – коллиматор; 4 – контролируемая пластина; 5 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП); 6 – линза; 7 – блок питания ЭОП; 8 – визуальное наблюдение или фотоаппарат

Подставляя $\lambda = 1,15$ мкм, $n = 3,4$ (для Si), получим $d_2 - d_1 = 0,17$ мкм.

Интерференционные максимумы выражены весьма четко, а расстояние между ними для плоскопараллельных образцов может достигать сантиметра. Таким образом, учитывая, что при фотографическом методе можно без труда измерить смещение порядка одной пятой полосы, разрешающая способность метода составляет около 0,03 мкм.

Контроль топографии пластин методом светового сечения (структуризованного света). В данном методе поверхность контролируемого объекта освещают световым потоком, имеющим определенную форму сечения структурированным светом. Отражение от поверхности может быть точно рассчитано для каждой ее точки. Например, если световой поток плоский, то при падении на плоскую поверхность образуется прямая линия, если поверхность имеет сложный профиль сечения, то на регистрирующем приборе при определенном угле падения светового потока будет воспроизведена форма этой поверхности.

В сочетании с микроскопом метод обеспечивает точность до 7 мкм при ширине светового потока (размере светящейся щели) около 3 мкм. Проведенные экспериментальные работы подтвердили возможность применения данного метода для автоматического контроля качества.

Существует две разновидности установок для реализации данного метода – двумерные (2D) и трехмерные (3D). В первом случае снимается световой профиль изображения объекта вдоль определенного сечения, по параметрам которого судят о качестве объекта, во втором – производится ряд последовательных сканирований, в результате которых образуется набор профилей, представляющих световой отклик всей поверхности.

Двухмерные системы оптического контроля. Принцип работы системы этого типа приведен на рис. 8.90, структурная схема установки для автоматического кон-

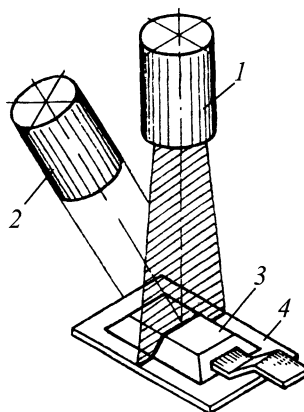


Рис. 8.90. Принцип метода светового сечения:

1 – проектор; 2 – детектор изображения;
3 – паяное соединение; 4 – печатная плата

троля ПС методом светового сечения – на рис. 8.91. В системе важное значение имеет выбор оптимального угла между осью проекции щели на контролируемую деталь и осью детектора изображения. Оптимальной является схема, при которой изображение щели проецируется вертикально, а детектор изображения установлен под углом к этой поверхности. В этом случае возможно стабильно контролировать форму сечения ПС без влияния соседних элементов.

Алгоритм включает в себя выделение огибающей видеосигнала, предварительную обработку профиля светового сечения, определение и классификацию вида дефекта ПС. Световое сечение от реального объекта на выходе детектора приведено на рис. 8.92 и представляет собой зашумленный сигнал, имеющий разрывы, обусловленные отражением света от наклонных поверхностей соединения.

Снижение зашумленности изображения производят методом медианной фильтрации, восстановление выпавших частей светового сечения – методом пошаговой интерполяции, который заключается в сравнении сигнала на данном элементе разложения с уровнями на соседних элементах и присвоении ему нового значения как среднего из трех величин.

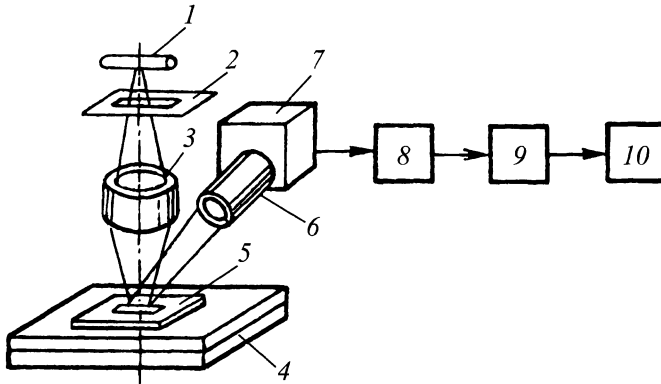


Рис. 8.91. Структурная схема

установки автоматического оптического контроля ПС:

1 – лампа; 2 – щель; 3 – проекционный объектив; 4 – двухкоординатный стол;
5 – печатная плата; 6 – фокусирующий объектив; 7 – видеокамера; 8 – блок выделения
огibaющей формы сигнала; 9 – блок анализа огibaющей сигнала; 10 – блок оценки
формы огibaющей сигнала

Такая процедура позволяет устранить отдельные искажения в профиле сечения (рис. 8.92, б). Для определения базового уровня строится гистограмма вдоль оси Z (рис. 8.92, в), при этом величина z_b определяется как первый максимум, превышающий определенный постоянный порог при переходе от малых значений z_b к большиим. Полученная величина z_b в дальнейшем используется для определения высоты профиля светового сечения.

Для определения вида дефекта по параметрам профиля светового сечения используют маски, накладываемые на анализируемый участок программными средствами.

Реализация этого достаточно просто по принципу действия метода наталкивается на следующие две трудности:

1) требуется аппаратура с повышенной разрешающей способностью, особенно при контроле ТМП ПС с малым расстоянием между выводами;

2) наблюдается на практике "ослепление" камеры при прямом отражении в нее света из-за высокой, практически зеркальной, отражающей способности поверхности ПС, а также "провал" в изображении вследствие наличия на поверхности

участков, практически не отражающих свет; в обоих случаях происходит потеря информации.

Трехмерные системы оптического контроля. В отличие от двухмерных в трехмерных системах происходит последовательное сканирование всей поверхности соединения, в результате чего получают трехмерное (изометрическое) изображение светового отклика соединения. Такие системы регистрируют информацию по координате z в каждой точке поверхности x, y . При таком подходе возможно построение карт (линий равных сигналов) светового отклика и анализ соединений методами распознавания образов. В этом случае вместо использования эталонного портрета статистическими методами выделяют определенные параметры светового отклика соединения, устанавливают их числовые характеристики, формулируют правила и критерии разбраковки, которые реализуются программными средствами.

Особенность применения данного метода для контроля качества ПС состоит в том, что принятие решения о качестве соединения производится не на основании

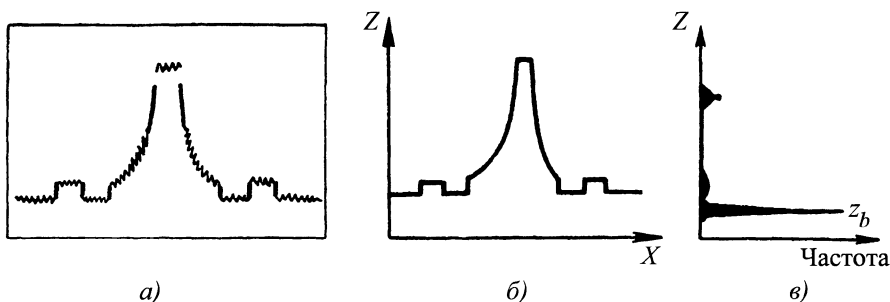


Рис. 8.92. Выделение огибающей видеосигнала и определение базовой линии (начала отсчета) построением гистограммы:
 а – видеосигнал; б – выделенная огибающая; в – гистограмма

сравнения абсолютных значений параметра образца и эталона, а на многократных измерениях нескольких параметров и учете взаимных связей между ними.

Разработана установка для трехмерного контроля качества ПС, испытания которой показали высокую воспроизводимость результатов при многократном повторном контроле одних и тех же плат, а также хорошее совпадение с результатами визуального контроля. Анализ возникших противоречий показал, что причиной их проявления были ошибки оператора в идентификации дефектов либо их пропуск.

Разработанная система может быть использована как для контроля качества ПС, так и, что более важно, для оценки параметров технологического процесса путем анализа причин появления дефектов и корректировки процесса по результатам контроля через систему обратной связи. Можно также накапливать данные для их последующей обработки.

Метод рассеянного света. В основе метода лежит освещение ПС световым потоком, направленным под определенным углом к его поверхности, регистрация и анализ получаемого при этом светового отклика. На практике используют освещение при малых и больших углах падения светового потока. Метод обладает такими преимуществами, как высокая скорость контроля при относительно низкой стоимости аппаратных средств; возможность

использования стандартных, серийно выпускаемых объективов и осветителей, гибкость, т.е. возможность использования для контроля широкого класса ПС.

Существуют некоторые условия (ограничения) применения метода. В частности, поверхность, на которой располагаются ПС, должна быть плоской, все ПС должны иметь одинаковые размеры и располагаться на равных расстояниях друг от друга, изменения в топологии поверхности ПС должны быть обусловлены только особенностями ПС, а не влиянием других компонентов. Предполагается также, что направление взгляда перпендикулярно контролируемой поверхности и размеры ПС много меньше по сравнению с рабочим расстоянием объектива. При выполнении этих условий минимизируется дисторсия, снижаются требования к точности фокусировки, координаты изображения объекта могут быть соотнесены с координатами объекта без введения коррекции (поправки) на дисторсию.

Способы освещения объекта. Используют такие способы освещения, которые позволяют наиболее полно выявить топологию поверхности ПС, что позволяет значительно упростить используемые при последующем анализе программные средства. Наиболее важными являются такие параметры осветителя, как направление светового потока и его пространственное расхождение.

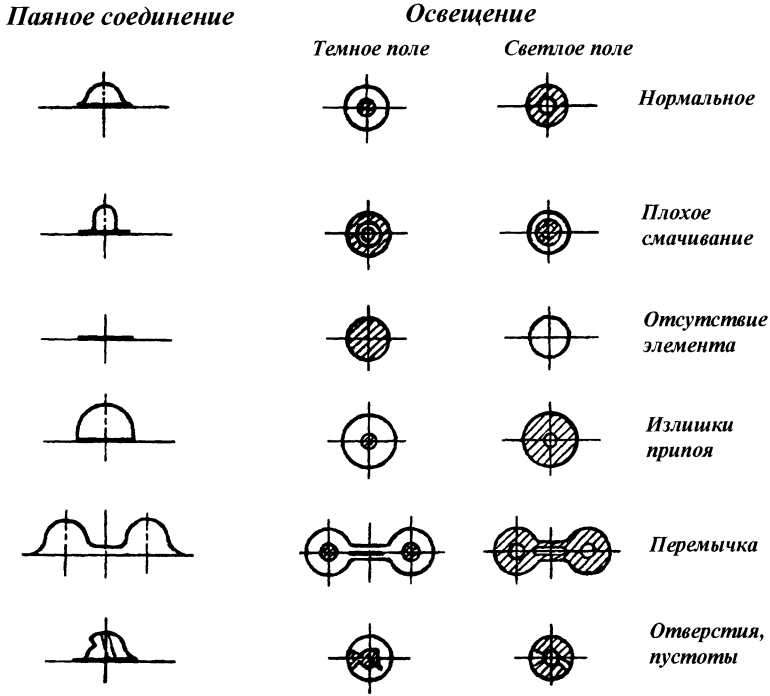


Рис. 8.93. Световые образцы (сигнатуры) дефектов при освещении по методу светлого и темного поля

Проведенные экспериментальные исследования различных способов и схем показали, что наиболее рациональным является диффузионный источник с центральной симметрией. Такой источник создает бестеневое, однородное освещение, что позволяет избежать ярких пятен на исследуемой поверхности, приводящих к насыщению регистрирующего прибора и пропуску части информации.

На практике используют освещение по методу светлого или темного поля. В первом случае свет падает под большим углом к поверхности ПС, при этом соединение имеет большую яркость по сравнению с основанием; во втором случае угол падения света на поверхность невелик, большая часть света не попадает в объектив, при этом изображение поверхности ПС выглядит более темным по сравнению с основанием.

Обычно требуется совместное использование обоих методов, что позволяет выявлять разнообразные дефекты ПС, поскольку они имеют различную чувствительность к методам освещения.

Световые образцы (сигнатура) дефектов. Световые образцы дефектов при освещении по методу светлого и темного поля приведены на рис. 8.93.

Большинство дефектов проявляется в виде изменения формы или появления разрывов в изображении.

Характеристики светового отклика зависят от формы сечения луча, источника излучения, размеров осветителя, кривизны поверхности. На практике обычно используют освещение световым потоком с центральной симметрией. При взаимодействии с выпуклой сферической поверхностью такой источник образует две кольцевые области с резкой границей между ни-

ми. При отклонении формы поверхности от идеальной изменяются характеристики границы областей. Это свойство используют для расчета светового отклика поверхностей различной формы и составления библиотеки дефектов соединений.

Перемычки припоя легко выявляются при освещении по методу темного поля как две почти параллельные линии между контактными площадками. Использование освещения с центральной симметрией позволяет выявлять перемычки припоя вне зависимости от их расположения, размеров и ориентации на плоскости. Темнопольное освещение подчеркивает края, царапины, трещины и другие нарушения поверхности.

Значение средней интенсивности светового отклика поверхности характеризует ее микроструктуру и металлургические особенности соединения. Так, например, световой отклик холодных паек имеет меньшую яркость по сравнению с нормальным соединением, аналогичный эффект вызывают загрязнения ПС остатками флюса.

Спектральный состав освещения влияет на контраст получаемого изображения. Результаты проведенных исследований спектрального состава отраженного от ПС света на припое 60Sn40Pb и припойной пасте того же состава приведены на рис. 8.94, где показана отражательная способность поверхности ПС по отношению к зеркально полированному алюминию на длине волны 0,8 мкм. Наибольшее различие получено в диапазоне 0,45 ... 0,55 мкм, на более длинных волнах кривые отражения совпадают.

Алгоритмы обработки видеозображения. На выходе ТВ-камеры получают аналоговый, полутоновый видеосигнал (в "серой" шкале), соответствующий световому отклику поверхности ПС. Далее для разделения изображений подложки и ПС вводится опорный уровень, после чего оставшееся изображение нормализуется для повышения контрастности путем построения гистограммы. Для этого рассчи-

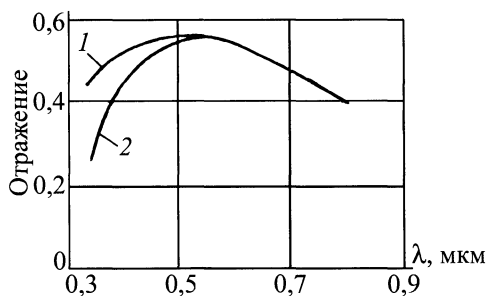


Рис. 8.94. Спектральные характеристики отражения для различных материалов:

1 — паяльная паста; 2 — припой

тывают минимальное и максимальное значения интенсивности в изображении, определяют масштабный фактор для преобразования интенсивности и располагают значения интенсивности между двумя предельными значениями в области полутонового изображения с учетом этого фактора.

На изображение группы ПС накладывается (программно) прямоугольная маска, размеры которой выбирают с учетом допусков на размеры ПС и погрешностей позиционирования.

Выявление дефектных ПС производят путем анализа пространственных характеристик отклонений, появившихся в световом отклике ПС, изменений ширины и средней высоты пиков по сравнению с расчетными (ожидаемыми) значениями.

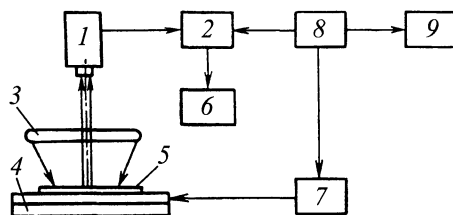


Рис. 8.95. Структурная схема установки автоматического контроля ПС методом рассеянного света :

- 1 — видеокамера; 2 — видеопроцессор;
- 3 — круговой (кольцевой) осветитель;
- 4 — двухкоординатный стол; 5 — печатная плата;
- 6 — ТВ-монитор; 7 — контроллер;
- 8 — управляющая ЭВМ; 9 — принтер

Так, например, при отсутствии вывода интенсивность отклика резко снижается, широкий пик говорит о наличии мостика припоя. Снижение среднего значения светового отклика свидетельствует о появлении холодной пайки, загрязнении или сдвиге ПС в момент кристаллизации припоя.

Структурная схема установки приведена на рис. 8.95. В состав системы входят твердотельная камера, видеопроцессор, двухкоординатный стол, осветитель, управляющая ЭВМ.

8.6.3. Видеодиагностика светодиодов и ВОЛС

Регистрация распределения яркости по сечению пучков света. Распределение яркости по сечению пучка света, излучаемого источником или проходящего по световоду, всегда неоднородно. Характер этой неоднородности для таких источников, как светодиоды или лазерные диоды, представляющих собой многослойные полупроводниковые структуры, зависит от особенностей их состава и строения, величины приложенного напряжения, тока, температуры и ряда других факторов. Изменение любого из них влияет на характер этой неоднородности.

Неоднородность распределения яркости по поперечному сечению пучков света, распространяющихся в световодах, также вызывается совокупным действием многих факторов и прежде всего структурными и волноводными параметрами световодов. Изменения значений этих параметров, вызываемые какими-либо внешними причинами, могут весьма существенно сказываться на структуре пучков света, прошедших по световоду.

Размеры излучающих площадок полупроводниковых источников света и площадей поперечного сечения волоконных и планарных световодов, применяемых в системах связи и сенсорных устройствах, могут быть очень малыми – сотни или десятки квадратных микрометров.

Для наблюдения и регистрации световых картин, соответствующих исследуемым светодиодам, лазерным диодам и световодам, необходимо пользоваться микроскопом.

В настоящее время данные о распределении яркости излучения по сечению пучков света получают:

- визуальным наблюдением на экране черно-белого дисплея видеоизображений световых картин, получаемых от исследуемых объектов при 500 ... 600-кратных увеличениях;

- регистрацией (сканированием с помощью специальной видеокамеры) яркости излучения в каждой точке поперечного сечения пучка света (в ближней или дальней зоне), обработкой на ЭВМ полученных данных и представлением результатов в виде таблиц или графиков.

Эти методы именуют в литературе методами видеодиагностики. Простейший метод видеодиагностики – визуальное наблюдение картины излучения от исследуемого объекта, например светодиода, на экране черно-белого дисплея (рис. 8.96). Этот метод позволяет получить общее представление о распределении яркости по сечению пучка. Возможности его очень ограничены, так как оператор может различать на экране черно-белого дисплея и качественно сопоставлять лишь наиболее резко различающиеся светлые и темные участки на световой картине.

Для одновременного получения изображения микроструктуры пучка света и количественных данных, характеризующих распределение яркости по сечению пучка, пользуются аппаратурой, показанной на рис. 8.97. Исследуемая световая картина проецируется в плоскости предметного столика 1 микроскопа 2 таким образом, чтобы ее можно было наблюдать в микроскоп в ближнем или дальнем поле. Сигналы, получаемые от видеокамеры 3 при сканировании поля зрения микроскопа, поступают на вход видеодигитайзера 5. Для контроля резкости наводки на фокус и

корректировки расположения световой картины в поле зрения микроскопа служит дисплей 4. Видеогитайзер 5 преобразует полученные от видеокамеры данные в цифровой код и подразделяет их на дискретные группы по шкале уровней яркости. МикроЭВМ 6, реализуя соответствующую программу, формирует отображаемую на экране цветного дисплея 7 картину микроструктуры пучка света, выходящего из объекта, регистрируемую самописцем 8. Изображение микроструктуры оказывается разделенным на зоны или области, каждая из которых соответствует определенному интервалу значений яркости и окрашивается в заранее выбранный цвет.

Видеоцветовая диагностика позволяет получать более полную информацию о структуре пучков света, чем при просмотре черно-белых картин, формируемых по неквантованным видеосигналам. Кодирование цветом обеспечивает четкое разграничение участков различной яркости согласно шкале квантования, а способность человека легко различать оттенки цветов облегчает задачу распознавания.

При видеоцветовой диагностике обычно используются шесть-восемь различных цветов, каждому из которых соответствует свой интервал значений яркости. Существенный недостаток метода видеоцветовой диагностики заключается в том, что он не позволяет определить, насколько плавными или, наоборот, резкими оказываются переходы между регистрируемыми интервалами значений яркости.

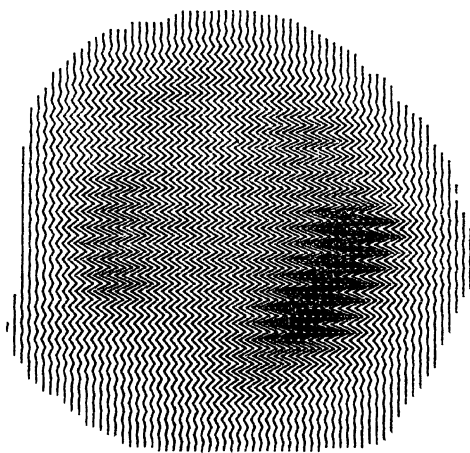


Рис. 8.96. Негативное изображение световой картины распределения яркости по сечению светового пучка на выходе из светодиода, получаемое с помощью обычной телевизионной камеры. Более темные участки картины соответствуют участкам наибольшей яркости

Это затрудняет интерпретацию получаемых цветных изображений, которые можно именовать видеодиаграммами.

Описанный метод видеодиагностики был упрощен путем кодирования яркости излучения штриховкой различного вида с получением изображений на экране простого черно-белого дисплея. На рис. 8.98 показана кодированная штриховкой картина, отображающая распределение яркости излучения по сечению светового пучка на выходе из полупроводникового светодиода.

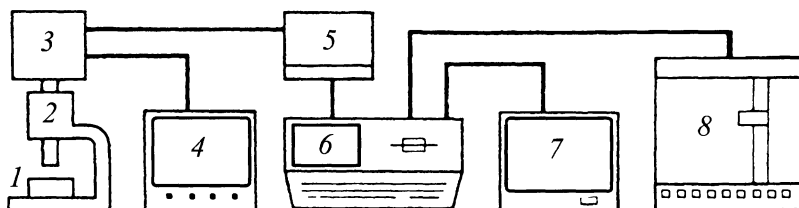


Рис. 8.97. Схема комплекса аппаратуры для видеодиагностики

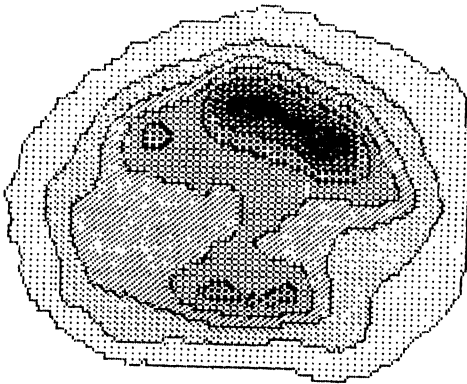


Рис. 8.98. Видеоштриховое изображение микроструктуры пучка света, излучаемого светодионом

Другая разновидность видеодиагностики – получение квазитрехмерных изображений (видеограмм), характеризующих микроструктуру пучка света в его поперечном сечении. Рельеф таких видеограмм дает наглядное представление об этой микроструктуре. На рис. 8.99 показаны в различных ракурсах квазитрехмерные изображения микроструктуры пучка света, излучаемого светодионом.

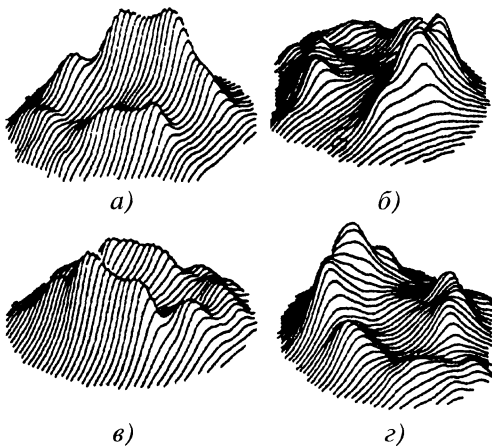


Рис. 8.99. Квазитрехмерная видеодиаграмма, характеризующая микроструктуру пучка света (а), повернутая относительно своей вертикальной оси на 90° (б), 180° (в) и 270° (г)

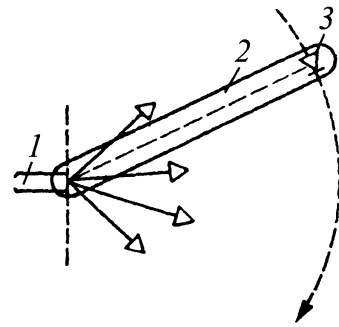


Рис. 8.100. Схема устройства для регистрации распределения яркости излучения в дальнем поле:

1 – волоконный световод, из торца которого выходит пучок света; 2 – держатель фотодетектора 3, перемещаемого по азимуту

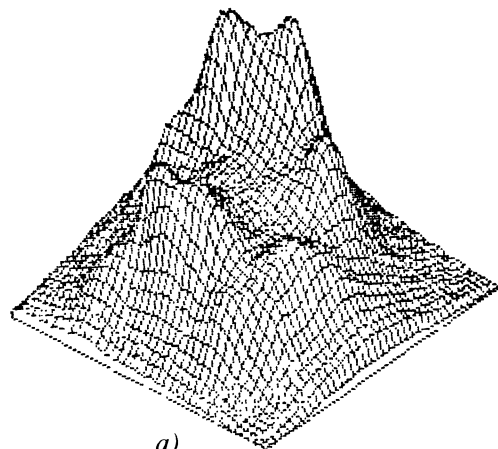
Видеодиагностика волоконных световодов и градиентных стержневых линз ("селфокв"). Регистрация световых картин, характеризующих распределение яркости излучения, выходящего из торца волоконного световода, может быть применена, например, в следующих случаях: для определения того, насколько близко к равновесному распределению мод в волокне; при исследовании конверсии мод в световоде; для выявления различных дефектов в волоконном световоде и т.д.

На рис. 8.100 показана схема простейшего устройства для видеодиагностики волоконных световодов, позволяющего с помощью фотодетектора, перемещаемого относительно торца исследуемого волоконного световода, определять, например, распределение яркости излучения, прошедшего по волокну.

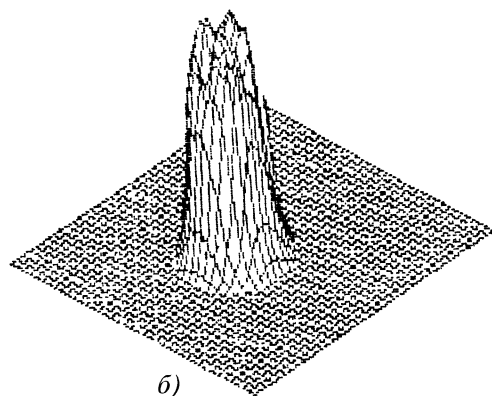
Использование техники получения штриховых и квазитрехмерных видеограмм, телевидения и обработки на ЭВМ является основой современной видеодиагностики. В настоящее время на получение таких видеограмм и их расчет затрачивается по 2 ... 3 мин, поэтому видеодиагностика может рассматриваться как один из методов эффективного контроля качества компонентов световодных систем связи и технологических процессов изготовления оптических волокон, оптических разъем-

ных соединений, градиентных линз, источников света и т.д. Так, на штриховых и квазитрехмерных видеogramмах ясно различимы дефекты в волокне, вызывающие искажения модовой структуры проходящего по световоду излучения, распределение мощности светового потока по сечению сердечника и оболочки волокна (рис. 8.101).

Допустимое значение радиуса изгиба, при котором в волоконном световоде не возникают регистрируемые интегральные потери (по всему сечению пучка света,



а)



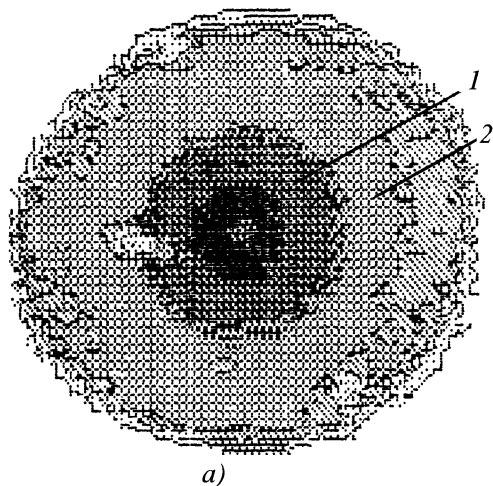
б)

Рис. 8.102. Квазитрехмерные видеogramмы микроструктуры пучка, излучаемого светодиодом плохого (а) и удовлетворительного (б) качества

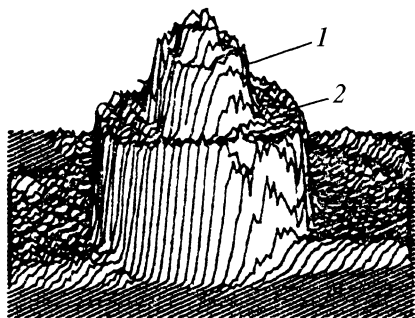
прошедшего по световоду), считают одной из важных характеристик параметров оптического волокна. Предельное (минимальное) значение допустимого радиуса изгиба указывают в технических условиях на каждый тип светового кабеля.

По видеogramмам распределения яркости по поперечному сечению пучка света, вышедшего из волоконного световода, можно судить о характере и степени влияния изгиба на модовую структуру и распределение оптической мощности между модами, проходящими по световоду.

На рис. 8.102 приведены квазитрехмерные видеogramмы пучков света, излу-



а)



б)

Рис. 8.101. Штриховая (а) и соответствующая ей квазитрехмерная (б) видеogramмы распределения мощности излучения между каналируемыми (1) модами и модами оболочки (2) в ступенчатом волоконном световоде вблизи его входного торца

чаемых плохим и хорошим полупроводниковыми источниками. Пользуясь видеogramмами такого рода, можно оценивать и сравнивать качество излучателей, применяемых в световодной технике.

8.6.4. Лазерная сканирующая микроскопия изделий электроники

Применение телевизионных приставок к традиционным оптическим микроскопам хотя и повышает удобство работы и позволяет получать количественные характеристики исследуемого объекта при анализе видеосигнала, однако не позволяет получать изображение за счет фотоэффекта.

Разрешающая способность растрового оптического микроскопа (РОМ) определяется диаметром светового пятна в плоскости объекта, увеличение – соотношением линейных размеров растров на поверхности объекта и экране кинескопа. Отсутствие оптики, формирующей изображение, в тракте регистрации отраженного или прошедшего света позволяет вводить в этот тракт спектральные или анализирующие устройства без потери разрешающей способности.

Наиболее распространенными являются РОМ на основе газовых лазеров. Сканирование лазерного луча (как и в системах проекции на большой экран) может осуществляться либо механическими системами с вращающимися или вибрирующими зеркалами, либо электрооптически или акустооптическими дефлекторами со всеми присущими им недостатками. При этом для получения светового пятна малых размеров необходимо многоступенчатое уменьшение с большой кратностью, что приводит к необходимости уменьшения рабочего отрезка объектива и поля зрения, а следовательно, ограничивает возможности лазерного РОМ. Невелик и выбор длин волн, на которых излучают газовые лазеры, используемые в качестве источников света в РОМ.

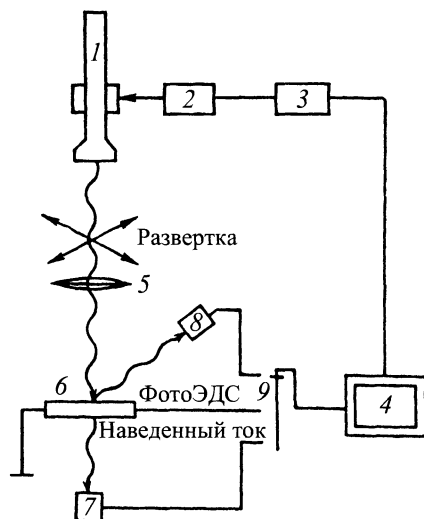


Рис. 8.103. Принципиальная схема растрового оптического микроскопа на основе квантоскопа:

- 1 – квантоскоп с отклоняющей системой;
- 2 – блок развертки; 3 – блок синхронизации разверток; 4 – телевизионный монитор;
- 5 – объектив; 6 – образец; 7 – фотоприемник проходящего излучения; 8 – фотоприемник рассеянного (отраженного) излучения;
- 9 – переключатель регистрируемых сигналов

Микроскоп, выполненный на базе электронно-лучевой трубки, предназначенной для телевизионных систем с бегущим лучом, обладает рядом существенных недостатков, в частности малой интенсивностью светового луча из-за низкого коэффициента использования излучения ЭЛТ объективом (не более нескольких процентов). Это связано в основном с косинусной расходямостью излучения ЭЛТ и необходимостью применения оптики с большим коэффициентом уменьшения и соответственно малой светосилой. Кроме того, относительно широкий спектр излучения ЭЛТ и ограниченная длительность послесвечения люминофора препятствуют достижению предельной разрешающей способности РОМ и расширению частотных пределов диапазона разверток.

Преодоление недостатков известных РОМ возможно при использовании в качестве источника излучения сканирующего

полупроводникового лазера с продольной накачкой электронным пучком. Схема РОМ на основе квантоскопа (рис. 8.103) подобна схеме РОМ на основе ЭЛТ. Электронный пучок квантоскопа 1 с помощью отклоняющей системы и генераторов развертки 2 разворачивается в растр на активном элементе. Посредством блока синхронизации 3 осуществляется синхронная развертка в растр электронного пучка кинескопа телевизионного монитора 4. Светящийся растр на активном элементе с объектива 5 переносится с уменьшением в плоскость исследуемого объекта 6. Прошедший через объект или отраженный (рассеянный) свет регистрируется фотоприемниками 7 и 8. Переключатель 9 позволяет направить на монитор 4 сигнал наведенного тока или фотоЭДС непосредственно от объекта.

Использование катодолюминесценции для формирования оптического изображения проще в реализации, однако даже при сравнимых КПД лазерного и люминесцентного преобразователей мощность светового луча на объекте в последнем случае более чем на два порядка ниже, что повышает требования к регистрирующей аппаратуре.

На основе активного элемента квантоскопа реализован и испытан РОМ, в котором электронный пучок формируется с помощью электронно-зондовой системы растрового электронного микроскопа (РЭМ). Изображения были получены при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка несколько микроампер. При указанных параметрах электронного пучка его диаметр в плоскости активного элемента из CdS превышает 1 мкм, а плотность тока составляет около 10 А/см². Рабочий отрезок электронной линзы увеличен примерно до 14 см. Использовались разложение изображения в стандартный телевизионный растр (625 строк) и более медленная развертка (800 строк). Был применен 15-кратный фотолитографический объектив ОБ-412, который при переднем и зад-

нем рабочих отрезках длиной 315 и 4 мм соответственно обеспечивал разрешение 1350 лин./мм на длине волны 546 нм, близкой к длине волны излучения CdS.

Для исследования объектов в рассеянном свете удобнее 10-кратный объектив ОБ-411А, который при прочих равных условиях хотя и обладает несколько худшей разрешающей способностью (950 лин./мм), но имеет больший задний рабочий отрезок (11,5 мм), что упрощает размещение гибкого световода для вывода рассеянного излучения на фотоприемник.

Область генерации света, возникающая при облучении активного элемента пучком быстрых электронов, может достигать нескольких микрометров. Поэтому в РОМ на основе квантоскопа нет необходимости применять объективы с большим коэффициентом уменьшения для реализации предельной (для используемой длины волны) разрешающей способности. При оптическом уменьшении в 10 ... 15 раз увеличение РОМ может превышать 1000 (максимальное достигнутое увеличение составляет 3000) и перекрытие диапазона увеличений примерно от 100 до 1000 может быть обеспечено электронно-оптически без замены объектива.

Предельная разрешающая способность РОМ может быть оценена из выражения, определяющего минимально разрешимое расстояние b_p между полосами штриховой миры как функцию контраста K_m :

$$b_p \approx (\lambda / 2\pi A_{об}) \{ [(1 - 2K_m) + (1 + 10K_m)^{1/2}] / 2(1 - K_m) \}^{1/2},$$

где $A_{об}$ – числовая апертура объектива; $K_m = (L_{макс} - L_{мин}) / L_{макс}$; $L_{макс}$ – освещенность в центре изображения светлой полосы; $L_{мин}$ – освещенность в центре изображения темной полосы.

При $K_m = 0,265$, что соответствует критерию Рэля, следует $b_p \approx 0,28\lambda / A_{об}$.

График зависимости $K_m(b_p)$ при $\lambda = 0,5$ мкм и $A_{об} = 0,2$ показан на рис. 8.104 (кривая 1). При отображении объекта на

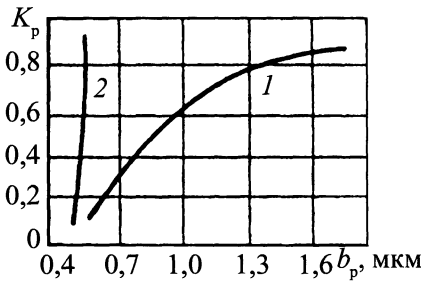


Рис. 8.104. Зависимость контраста от ширины полосы для определения разрешения по системе двух полос без вычитания (1) и с вычитанием постоянной составляющей (2)

экране кинескопа можно произвести предварительную обработку видеосигнала, улучшающую контраст изображения, например компенсировать постоянную составляющую видеосигнала. В этом случае, если вычитается постоянное значение $1/2 L_{\text{мин}}$, то минимально разрешимое расстояние равно

$$b_p = (\lambda / 2\pi A_{\text{об}}) \{ [(2 - 3K_{1м}) + 2(1 + 4K_{1м})^{1/2}] / (3 - K_{1м}) \}^{1/2},$$

где $K_{1м} = (L_{\text{макс}} - L_{\text{мин}}) / L_{\text{макс}} - 1 / 2L_{\text{мин}}$.
 При $K_{1м} = 0,265$, $b_p \approx 0,2\lambda / A_{\text{об}}$.

Компенсация постоянной составляющей видеосигнала позволяет получить более высокую разрешающую способность при заданном уровне контраста.

Таким образом, предельная разрешающая способность лазерного РОМ при одинаковых длине волны света и числовой апертуре объектива превосходит обычный микроскоп, причем разрешающая способность РОМ может быть улучшена вычитанием постоянной составляющей видеосигнала. Квантоскопы для РОМ должны иметь удельную разрешающую способность, близкую к предельной, достижение которой облегчается тем обстоятельством, что в РОМ необходимые размер активного элемента и мощность излучения могут быть во много раз меньше, чем при проекции на большой экран. К достоинствам

применения квантоскопов в РОМ относятся простота управления лазерным лучом, в частности, возможность в широких частотных пределах бланкировать электронный пучок (до 10^9 Гц) и осуществлять высокочастотную модуляцию лазерного луча. Это создает условия для осуществления в РОМ стробоскопического режима работы и проведения локальных измерений временных характеристик переходных процессов в исследуемых объектах.

Оперативное изменение длины излучения от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов спектра, осуществляемое сменой квантоскопов, исключительно важно при микроскопических исследованиях фотохимических реакций, фотолиза, фотораспада и т.д.

8.6.5. Перспективы совершенствования оптических методов контроля

Повышение требований к качеству и надежности изделий заставляет уделять все большее внимание обнаружению дефектов, возникающих в технологическом процессе их изготовления. Одним из основных средств отбраковки потенциально ненадежных изделий на различных этапах изготовления ИС является оптический метод контроля (ОМК). Этот метод, включающий ряд разновидностей, позволяет контролировать, например, качество кристаллов и оснований ИС, монтажа, металлических покрытий, сварных (термокомпрессионных) соединений (ТКС) и т.д. В технологических маршрутах операции оптического контроля повторяются до 20 и более раз.

Неизбежная субъективность операторов, усиливаемая сильной утомляемостью при работе с микроскопом, сложность обнаружения многих типов дефектов, высокий темп, обусловленный массовостью производства, невысокая точность и малая производительность существующих методов приводят к недостаточной эффективности ОМК. Весьма низкой является и достоверность контроля (она не превыша-

ет 60 ... 65 %). Вместе с тем дефекты металлизации, обрывы ТКС, дефекты в оксиде, которые должны быть выявлены при визуальном контроле, составляют в эксплуатации до 20 % общего числа отказавших ИС, несмотря на то, что операции оптического контроля ИС составляют 72 % общего объема контрольных операций. Приведенные данные о существующей технике оптического контроля ИС свидетельствуют о весьма низкой информативности ОМК.

В связи с переходом к выпуску ИС средней и большой степени интеграции (БИС) резко возрастает сложность рисунка топологии, растет трудоемкость оптического контроля, т.е. результаты контроля все больше зависят от визуальной интерпретации объекта контроля. В планарной технологии изготовления ИС основными элементами, во многом определяющими качество и надежность ИС, являются фотошаблоны. Их контроль затруднен тем, что требования к точности размеров и расположения элементов маски приближаются к предельным возможностям ОМК. Кроме того, в отличие от методов контроля фотошаблонов, используемых при производстве простых ИС по критическим областям на маске при контроле фотошаблонов, предназначенных для производства БИС, необходимо обеспечить 100 %-ый контроль площади маски. Поэтому весьма актуальным является поиск ОМК-фотошаблонов.

Оптимизация критериев отбраковки позволяет рационально сочетать растущие требования к надежности ИС со стремлением повысить выход годных и снизить себестоимость. Поэтому практическая значимость этого направления очень велика и его развитие требует совершенствования методологии выбора системы критериев и их норм для дефектов кристаллов и металлизации, защитного оксида, диэлектрической изоляции, ТКС и внутренних соединений и др. Анализ направлений совершенствования аппаратуры ОМК ИС целесообразно вести с учетом ее

стоимости, состояния разработки и производства и других технико-экономических факторов, влияющих на внедрение. Одним из перспективных методов, позволяющих увеличить эффективность ОМК ИС, является метод растровой электронной микроскопии (РЭМ), с помощью которого можно выявлять дефекты, не обнаруживаемые существующими ОМК.

Проекционные устройства предназначены для визуального контроля изделий на обзорном экране и облегчают труд операторов, так как при этом устраняется необходимость аккомодации глаз и появляется возможность принять более удобную позу при наблюдении.

Общим недостатком существующих проекторов является небольшая яркость изображений и уменьшение разрешающей способности по сравнению с наблюдением изделий в бинокулярный микроскоп. Малая яркость изображений не позволяет получать увеличения больше 100 ... 200^x.

Более совершенными устройствами являются лазерные и цветные телевизионные проекторы. Возможность усиления яркости и контраста изображений, сравнительно малые световые нагрузки на изделие делают исследования в этом направлении весьма перспективными. Большие возможности телевизионных проекторов создают предпосылки для автоматизации процессов измерения и контроля.

Для автоматизации ОМК ИС при больших объемах поставок перспективным является "сжатие" информации в процессе ее съема и обработки. В методах сжатия друг на друга накладываются изображения объекта и эталона, которые могут быть разного цвета, разной поляризации или в обратных интенсивностях (позитив и негатив). Результатом сложения является выделение различий объекта и эталона (дефектов) в виде пятен, отличных от фона по интенсивности и цвету, что на несколько порядков уменьшает количество информации, перерабатываемой оператором, и резко сокращает его утомляемость и вероятность ошибок.

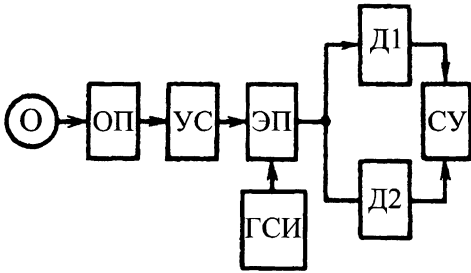


Рис. 8.105. Типовая структурная схема автоматического сортировщика изделий по внешнему виду

Большие возможности когерентных и некогерентных аналоговых устройств по выполнению информационно-емких операций предварительной обработки изображений и выделению дефектов в сочетании с высокой разрешающей способностью создают предпосылки для широкого развертывания исследований в этом направлении. Особую значимость приобретают методы оптической (когерентной и некогерентной) пространственной фильтрации. Особенность когерентной фильтрации состоит в двукратном (прямом и обратном) преобразовании Фурье входного изображения. Выделение дефектов происходит в результате различий в пространственно-частотных спектрах дефектов и периодических структур. Но в этом случае яркость изображения на экране определяется не площадью изображения дефекта (как при оптическом некогерент-

ном сложении), а периметром, что значительно облегчает выявление микронных (до 1 ... 2 мкм) дефектов на весьма больших полях (например, 5 × 5 мм).

В производстве ИС можно выделить три типа задач контроля с использованием ОМК, которым соответствуют определенные схемы контрольных автоматов. Автомат сортировки изделий по внешнему виду (рис. 8.105) работает следующим образом. Изображение объекта (O) последовательно преобразуется в оптическом преобразователе (ОП), который в данном случае увеличивает масштаб изображения, и в устройстве считывания (УС), представляющем собой оптоэлектронное устройство с оптико-механической или электронно-оптической разверткой, оптическое изображение преобразуется в фотоэлектрический сигнал. Фотоэлектрический сигнал формируется электронным преобразователем (ЭП) и генератором счетных импульсов (ГСИ) и подается на временной и амплитудный дискриминаторы Д1 и Д2, с которых выдаются сигналы разбраковки на сортирующее устройство (СУ). Таких дискриминаторов в системе может быть несколько.

Устройство на рис. 8.106 по способу считывания и преобразования изображения и фотоэлектрического сигнала аналогично устройству на рис. 8.105. Отличие

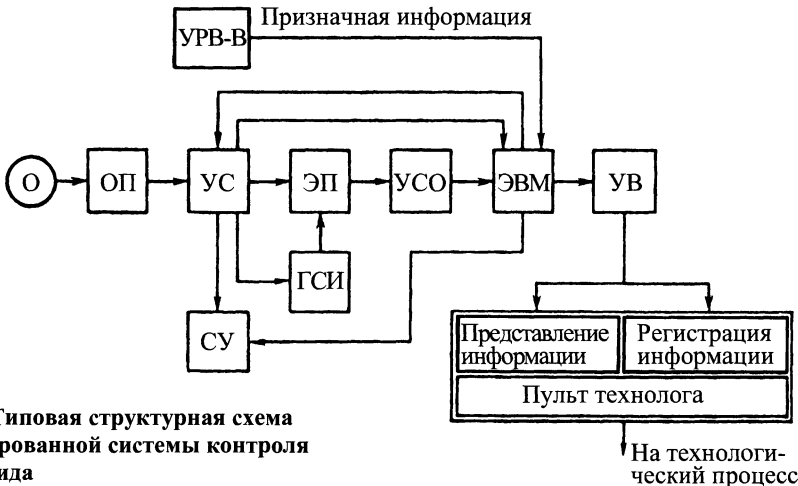


Рис. 8.106. Типовая структурная схема автоматизированной системы контроля внешнего вида

состоит в составе операций обработки информации и реализующих ее средствах, а также в средствах обратной связи с технологическими процессами, обеспечивающими активный характер контроля. Фотоэлектрический сигнал, преобразованный, как и в предыдущем случае, во временную последовательность электрических импульсов, поступает через устройство согласования с объектом (*VCO*) на вычислительную машину. Управление ЭВМ осуществляется от устройства считывания, и обработка информации ведется в реальном масштабе времени.

Результаты анализа внешнего вида изделия выдаются на сортирующее устройство по типам дефектов, а также через устройству вывода (*VB*) на пульт технолога в виде представляемой и регистрируемой информации. Для обеспечения корректной связи технолога с технологическим процессом на машину через устройства ручного ввода-вывода (*УРВ-В*) вводится призначная информация (номер партии, смены, станка, табельный номер оператора и т.д.).

На рис. 8.107 представлена структурная схема устройства фильтрации телевизионного типа.

Изображение топологии контролируемой *1* и эталонной *5* структур при помощи призм *2, 4* и оптической системы *6* проецируются на мишень телевизионного датчика *7*, преобразующего изображения в электрический сигнал. Блок обработки *8* формирует электрические сигналы, соответствующие позитивным и негативным изображениям структур. Далее эти сигналы попадают в сумматор *9*, где попарно складываются с учетом временной задержки, обусловленной последовательным считыванием контролируемого и эталонного изображений. Результирующий разностный сигнал воспроизводится видеоконтрольным устройством (*ВКУ*) *10*, и по выделенным дефектам оператор отбраковывает дефектные структуры. Для уменьшения влияния геометрических искаже-

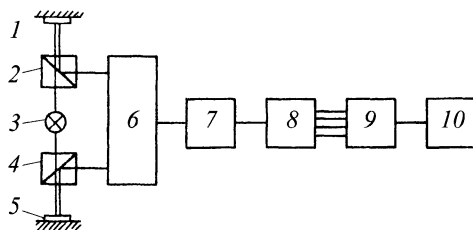


Рис. 8.107. Структурная схема устройства фильтрации телевизионного типа:

1 – контролируемая структура; *2, 4* – призмы; *3* – источник света; *5* – эталонная структура; *6* – оптическая система; *7* – телевизионный датчик; *8* – блок обработки; *9* – сумматор

жений, возникающих в оптической системе и телевизионном датчике, эталонное и контролируемое изображения передаются через один и тот же канал преобразования с последовательной коммутацией для раздельного считывания изображений.

Большие возможности когерентных аналоговых устройств по выполнению информационно-емких операций предварительной обработки изображений и выделению дефектов в сочетании с высокой разрешающей способностью обусловили разработку и создание устройств когерентной оптической фильтрации.

Одним из перспективных методов выделения дефектов регулярных структур, к которым относятся фотосаблоны и кристаллы ИС, является метод когерентной пространственной фильтрации, позволяющий выделять дефекты за счет различий их пространственно-частотных спектров и спектров периодических структур. Поскольку пространственно-частотные спек-

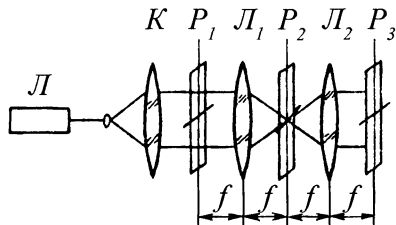


Рис. 8.108. Оптическая схема устройства когерентной оптической фильтрации:

Л – лазер; *К* – коллиматор; *Л₁, Л₂* – линзы (объективы); *P₁, P₂, P₃* – соответственно входная, частотная и выходная плоскости; *f* – фокусное расстояние

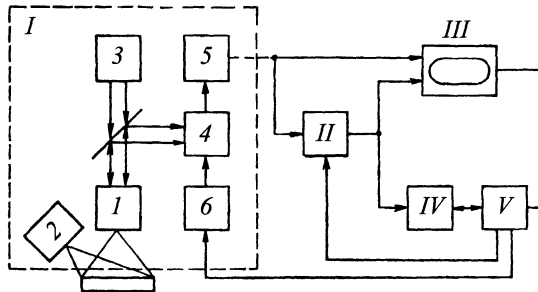


Рис. 8.109. Структурная схема ТВА контроля кристаллов по внешнему виду:

I – передающая камера: *1* – оптическая головка, *2, 3* – источники боковой и вертикальной подсветок; *4* – видикон; *5* – видеоусилитель; *6* – блок синхронизации разверток и питания; *II* – устройство предварительной обработки видеосигнала; *III* – видеоконтрольное и выходное устройство; *IV* – вычислительное устройство; *V* – логическое устройство

тры инвариантны к поперечным смещениям контролируемых объектов, в ряде случаев этот метод более эффективен, чем метод некогерентной оптики.

На рис. 8.108 изображена одна из возможных схем реализации этого метода. Контролируемый фотошаблон помещают во входную плоскость P_1 и освещают когерентным светом лазера L , расширенным коллиматором K .

Линза L_1 формирует Фурье-образ объекта в частотной плоскости P_2 , а линза L_2 производит его обратное Фурье-преобразование с учетом фильтрации спектра объекта транспарантом, с записью спектра эталона, размещенного в плоскости P_2 .

Большая часть дефектов внешнего вида изделий электронной техники (в том числе ИС) может быть обнаружена путем анализа локальных участков поверхности изделий. Это позволяет выбрать алгоритм, по которому изделие проверяется локально, участок за участком. Указанный алгоритм наиболее просто реализуется в специализированных вычислительных устройствах (процессорах), работающих по принципу электронного окна. Этот принцип положен в основу структурной схемы телевизионного атома (ТВА) (рис. 8.109).

Принцип работы этого ТВА заключается в следующем. Увеличенное изображение поверхности кристалла проецируется оптической головкой (объективом микроскопа) на мишень видикона, работающего в режиме построчной развертки с

частотой кадров $f_k = 6,25$ Гц и числом строк в кадре $n_k = 625$. С видеоусилителя сигнал подается на устройство предварительной обработки, в котором происходит квантование сигнала по уровню и по времени, кодирование сигнала и фильтрация изображения. Преобразованный сигнал поступает в вычислительное устройство, где происходит накопление и обработка поступающей информации в реальном масштабе времени. Логическое устройство задает программу работы всех перечисленных устройств, проводит вычислительные операции в машинном масштабе времени и осуществляет передачу данных (например, о количестве кристаллов с определенным типом дефектов) в выходное устройство, в котором эти данные фиксируются (цифровое табло, перфоратор). Видеоконтрольное устройство служит для визуального контроля в процессе настройки и работы ТВА.

Наиболее важными узлами ТВА являются: телевизионный датчик видеосигнала, который в итоге определяет разрешающую способность ТВА (под разрешающей способностью здесь понимается количество различных элементов изображения либо по строке, либо по кадру); детектор уровня, в котором происходит преобразование аналогового видеосигнала, соответствующего многоградационному изображению, в дискретный путем квантования по уровню; вычислительное устройство, в котором путем логической

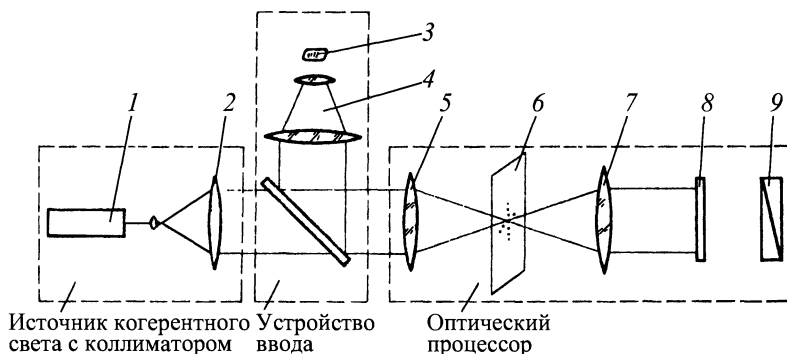


Рис. 8.110. Структурная схема оптического процессора:

1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – контролируемая структура; 4 – ПВМ; 5, 7 – линзы (объективы); 6 – режекторный фильтр; 8 – экран; 9 – поляриод

обработки кодированного видеосигнала определяются количественные характеристики изображения и производится распознавание образов.

Характерные функциональные возможности ТВА:

- определяются длина, периметр, площадь, средний линейный перерыв (количество пересечений границами объектов общей линии сканирования), фактор формы (функция вида AB/C^n , где $n = 1, 2, 3$, а A, B, C – любой из вышеперечисленных параметров объекта), количество объектов, оптическая плотность (интегральное значение любого параметра по всей площади изображения);

- производится классификация объектов по геометрическим размерам и распознавание образов (объектов) по геометрическим и денситометрическим признакам.

Другой разновидностью ТВА является автомат для считывания изображений. Назначение автомата – обнаружение дефектов печатных плат. Выявленные "подозрительные" участки с дефектами типа нарушения расстояния между различными металлизированными дорожками и изменения радиуса кривизны в месте изгиба последних индицируются на экране цветного видеоконтрольного устройства, на котором нормальные и "подозрительные" участки изображения печатной платы отличаются по цвету. Решение же о годно-

сти печатной платы принимается оператором. Методом электронного окна измеряются параметры (ширина металлизированной дорожки, ширина зазора между соседними дорожками, кривизна в месте изгиба дорожки и т.д.) локальных участков анализируемого изображения и одновременно распознаются указанные дефекты.

РС работает следующим образом. Световой пучок лазера 1 (рис. 8.110) расширяется коллиматором 2 и модулируется изображением контролируемой структуры 3, записанной на мишени пространственно-временного модулятора (ПВМ) 4. При контроле фотосаблонов наиболее прост и эффективен контроль на просвет, что позволяет вводить контролируемые структуры в устройство непосредственно. Линза 5 осуществляет Фурье-преобразование входного изображения и образует в задней фокальной плоскости пространственно-частотный спектр этого изображения. В эту плоскость помещают амплитудный режекторный фильтр 6, расположение заграждающих элементов которого соответствует пространственно-частотному спектру эталонной структуры. Дефекты (загрязнения, нарушения геометрических размеров и т.д.) имеют широкополосные спектры, и основная часть пространственных частот дефектов проходит через фильтр. Линза 7 осуществляет обратное Фурье-преобразование и выделяет дефекты топологии структуры проецируют на экран 8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев В.А.** Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
2. **Бабаев А.А.** Стабилизация оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 192 с.
3. **Быстров Ю.А., Колгин Е.А., Котлецов Б.Н.** Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
4. **Бычков О.Д.** Контроль внутренних поверхностей. М.: Энергия, 1975. 120 с.
5. **Голографические** неразрушающие исследования. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
6. **Грязин Г.Н.** Системы прикладного телевидения. Спб.: Политехника, 2000. 277 с.
7. **Данилов А.А.** Сенсорные устройства автоматов контроля и сборки. Л.: Машиностроение, 1984. 162 с.
8. **Измерения** в промышленности: Справочник. В 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы: Пер. с нем. / Под ред. П.Профоса. 2-е изд. М.: Металлургия, 1990. 492 с.
9. **Клюев В.В., Соснин Ф.Р.** Визуальный и измерительный контроль. М.: РОНКТД, 1998. 236 с.
10. **Лозовский В.Н., Бандал Г.В., Каксис А.О., Колтунов А.Е.** Диагностика авиационных деталей. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
11. **Лопухин В.А.** и др. Автоматизация визуального технологического контроля в электронном машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 287 с.
12. **Марков П.И., Кеткович А.А., Саттаров Д.К.** Волоконно-оптическая интроскопия. Л.: Машиностроение, 1987. 268 с.
13. **Машиностроение: Энциклопедист.** Т. III-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 464 с.
14. **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. VI-3: Надежность машин / Клюев В.В. Болотин В.В., Соснин Ф.Р. и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1998. 552 с.
15. **Морозов А.М., Кононов И.В.** Оптические топографические приборы. М.: Машиностроение, 1988, 128 с.
16. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
17. **Носов Ю.Р.** Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.
18. **Полоник В.С.** Телевизионные автоматические устройства. М.: Связь, 1974. 216 с.

19. **Синеглазов В.М., Протасов А.Г., Кеткович А.А.** Активная тепловая интроскопия. Киев: Техника. 1993. 168 с.
20. **Системы** очувствления и адаптивные промышленные роботы // Под ред. С.Н. Попова, В.В. Клюева, М.: Машиностроение, 1985, 256 с.
21. **Системы** технического зрения: Справочник / В.И. Сырянкин, Ю.Г. Якущенко и др. Томск: МГПРАСКО, 1992. 367 с.
22. **Справочная** книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1994. 472 с.
23. **Справочник** технолога-оптика / Под ред. С.М. Кузнецова, М.А. Окатова. М.: Машиностроение, 1983. 414 с.
24. **Теория** оптических систем: Учебник для вузов / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 432с.
25. **Фу К., Гонзалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
26. **Экологическая** диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2000. 496 с.

РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для неразрушающего контроля (НК) и диагностики объектов разного назначения используют радиоволны сверхвысоких частот (СВЧ), часто называемые в зарубежной литературе "микроволнами" (microwaves). Методы и техника СВЧ исторически развивались и применялись прежде всего в радиосвязи, радионавигации, радиолокации, радиоуправлении и т.п. В этих же традиционных направлениях применения техники СВЧ и проводились первые работы по СВЧ-измерениям, в том числе диэлектрических свойств материалов, используемых в указанных областях (например, волноводных диэлектрических окон магнетронов радиолокаторов, обтекателей антенн ракет и самолетов, элементов сложных антенн, радиолокационных укрытий и т.д.).

Радиоволновые методы и средства НК используют самостоятельно и в комплексе с другими традиционными методами. Преимущественная область применения – контроль неметаллических, а также полупроводниковых материалов, изделий и конструкций. При этом решаются задачи по толщинометрии, дефектоскопии, структуроскопии, влагометрии и скоростеметрии. Чувствительность методов зависит от поглощающих свойств материалов, а разрешающая способность – от используемого диапазона частот и некоторых геометрических параметров антенн СВЧ-преобразователей. Безусловное преимущество метода – его бесконтактность с объектом контроля (ОК).

К числу первых работ в области НК с применением радиоволн в России можно отнести авторское свидетельство № 49428 от 25 октября 1935 г. на "Устройство для определения неоднородности материалов при помощи электромагнитных волн" (авторы С.С. Брюхоненко, В.М. Самбора). Однако систематические исследования и применение устройств СВЧ для целей НК как в России, так и за рубежом начались в начале 50-х годов XX века. Так, в 1954 г. на заседании членов Немецкого керамического общества Е. Диг и А. Дитцель (ФРГ) сообщили о проведенных с помощью микроволн экспериментальных исследованиях по выявлению в огнеупорных изделиях трещин и изменений плотности. Установка была собрана из стандартных элементов и узлов трехсантиметрового диапазона радиоволн с механическим сканированием одиночных антенн, расположенных соосно с обеих сторон изделия.

В эти же годы в России начались исследования по применению методов и техники СВЧ в области НК и диагностики различных диэлектрических материалов и изделий из них. Работы проводились в ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре теоретических основ электротехники (проф. К.И. Крылов, проф. В.Н. Рудаков, В.П. Ковалев и др.), где была создана школа по одноканальной радиоинтроскопии, предложен и исследован радиополяризационный метод контроля структурной анизотропии диэлектриков.

В Москве в 1954–1957 гг. в электрофизической лаборатории при Институте

металлургии им. И.П. Бардина был поставлен и проведен цикл работ по разработке многоэлементного радиоинтроскопа прямого радиовидения (проф. П.К. Ощепков, к.ф.-м.н. В.А. Павельев и многие другие).

С образованием в 1964 г. НИИинтроскопии работы существенно ускорились, были созданы опытные образцы 100- и 1000-элементного радиоинтроскопов и структуроскопы (В.А. Павельев, Э.И. Вайнберг, И.А. Вайнберг, В.И. Матвеев, В.М. Кузнецов, В.П. Козлов, Ю.М. Тучнин, В.П. Рутковский, Ю.Н. Крючков, Л.А. Табакова и др.).

Огромный вклад в становление, развитие и разработку уникальных элементов систем внес акад. Н.Д. Девятков.

Большой вклад в развитие методов и техники СВЧ для НК внесли ученые из многих организаций различных городов страны и прежде всего профессора В.С. Семенов, Ф.И. Коломойцев, В.А. Конев, А.И. Потапов, Л.Г. Дубицкий, Д.А. Усанов,

М.А. Берлинер, В.В. Мериакри, д.т.н. В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков, Е.Ф. Кондратьев, О.О. Дробахин и многие другие. Результаты их работы отражены в различных изданиях, основные из которых приведены в списке литературы.

Книга написана на основе обобщения отечественных и зарубежных публикаций последнего времени, трудов Международных, Европейских и Российских конференций.

В книге кратко изложены основные понятия, физические и технические основы методов и средств СВЧ для НК и диагностики, разнообразные методы и приборы для решения наиболее важных прикладных задач.

Книга адресована разработчикам и пользователям средств СВЧ неразрушающего контроля. Она будет также полезна преподавателям, студентам вузов и научным работникам.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОВОЛНОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1. РАДИОВОЛНЫ

Радиоволны – это широкий спектр электромагнитного излучения, подчиняющегося общеизвестным законам электродинамики и, по мере укорочения длины волны, – оптическим. Радиоволны могут быть как естественного происхождения, т.е. собственное излучение нагретых сред (подобно инфракрасному излучению) и искусственные радиоволны, создаваемые генераторами электромагнитных колебаний. Весь электромагнитный спектр можно представить следующим образом (рис. 1.1).

СВЧ-диапазон радиоволн в связи со спецификой техники разбит на поддиапазоны, обозначаемые по-разному в России и за рубежом. В России принято следующее деление: метровый, дециметровый,

сантиметровый (10 – 1 см), миллиметровый (10 – 1 мм) и субмиллиметровый (1 – 0,1 мм) поддиапазоны.

За рубежом каждому микроволновому поддиапазону присвоена определенная латинская буква:

- P – (100 ... 77 см)
- L – (77 ... 19,3 см)
- S – (19,3 ... 5,77 см)
- X – (5,77 ... 2,75 см)
- K – (2,75 ... 0,834 см)
- Q – (0,834 ... 0,652 см)
- V – (0,652 ... 0,536 см)
- W – (0,536 ... 0,3 см)

Любая радиоволна характеризуется длиной волны или частотой (спектром), интенсивностью, амплитудой, фазой, поляризацией и типом волны.

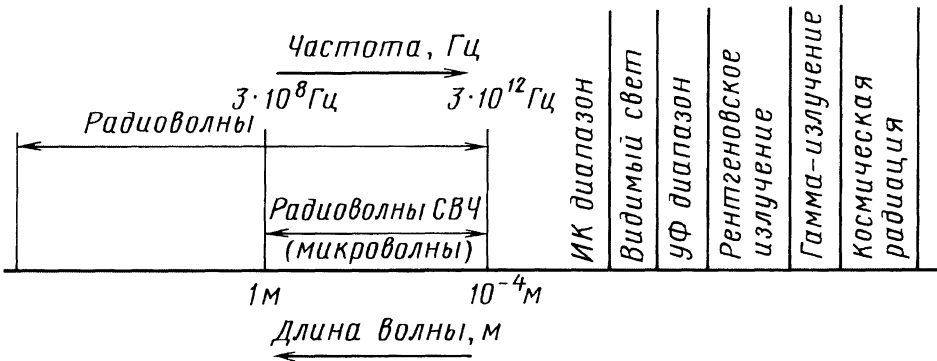


Рис. 1.1. Электромагнитный спектр

1.2. ОСОБЕННОСТИ РАДИОВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА

Радиоволновые методы основаны на использовании взаимодействия радиоизлучений с материалами контролируемых изделий. Это взаимодействие может носить характер взаимодействия только падающей волны (процессы поглощения, дифракции, отражения, преломления, относящиеся к классу радиооптических процессов) или взаимодействия падающей и отраженной волн (интерференционные процессы, относящиеся к области радиоголографии). Кроме того, в радиоволновых методах могут использоваться специфические резонансные эффекты взаимодействия радиоволнового излучения (электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс и др.). Использование радиоволн перспективно по двум причинам: расширение области применения диэлектрических, полупроводниковых, ферритовых и композиционных материалов, контроль которых другими методами менее эффективен; возможности использования особенностей радиоволн СВЧ-диапазона. К числу этих особенностей относятся следующие:

1. СВЧ-диапазон обеспечен большим перепадом мощностей генерируемых волн, что позволяет контролировать материалы и среды различной степени прозрачности, от весьма тонких до таких, как мощные бетонные основания.

2. Радиоволны СВЧ легко могут быть генерированы в виде когерентных поляризованных гармонических колебаний (волн), а это дает возможность обеспечивать высокую чувствительность и точность контроля, используя интерференционные явления, возникающие при взаимодействии когерентных волн с диэлектрическим слоем.

3. С помощью радиоволн СВЧ можно осуществить бесконтактный контроль качества при одностороннем расположении аппаратуры по отношению к объекту – способ контроля на отражение.

4. Радиоволны СВЧ могут быть остросфокусированы, что позволяет обеспечить локальность контроля, минимальный краевой эффект, помехоустойчивость по отношению к близко расположенным предметам, исключить влияние температуры объекта контроля на измерительные датчики и т.п.

5. Информация о внутренней структуре, дефектах и геометрии содержится в большом числе параметров полезного СВЧ-сигнала: амплитуде, фазе, коэффициенте поляризации и т.д.

6. Применение радиоволн СВЧ обеспечивает весьма малую инерционность контроля, позволяя наблюдать и анализировать быстропротекающие процессы.

7. Аппаратура СВЧ-диапазона может быть выполнена достаточно компактной и удобной в эксплуатации.

8. При использовании резонансных радиоволновых СВЧ-методов имеется возможность многопараметрового контроля геометрии, состава и структуры материала в "здоровой" и "дефектной" зонах.

Преимущественная область применения методов и техники СВЧ – это контроль полуфабрикатов, изделий и конструкций из диэлектрических, композиционных, ферритовых и полупроводниковых материалов, в которых радиоволны распространяются. От металлических структур радиоволны полностью отражаются, поэтому их применение возможно только для контроля геометрических параметров и поверхностных дефектов, а для толщинометрии металлических лент, листов, проката требуется двухстороннее расположение датчиков аппаратуры по отношению к объекту контроля.

Среди других особенностей радиоволнового контроля по сравнению с оптическим и радиационным следует отметить использование импедансного метода для расчета параметров сигналов и соизмеримость длины волны излучения с размерами радиоволнового тракта "источник из-

лучения – объект контроля – приемник излучения".

Излучения СВЧ относятся к области радиоволн, которые с момента своего открытия использовались для передачи информации. Применение волн СВЧ для целей НК потребовало создания теории их взаимодействия с ОК. Вполне естественно, что в разработанной теории были учтены результаты, полученные в радиосвязи для волновых систем с распределенными параметрами (длинных линий, волноводов и др.) импедансным методом, в котором радиоволновой тракт "источник излучения – объект контроля – приемник излучения" заменяется моделью в виде длинной линии. При этом канал распространения колебаний СВЧ (двухпроводные линии, волноводы, свободное пространство) характеризуют *волновым сопротивлением* $z = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a}$, где μ_a и ε_a – соответственно абсолютная магнитная и диэлектрическая проницаемость среды. Для идеального диэлектрика оно вещественно и при $\varepsilon_r = 1$ равно $z_0 = 377$ Ом.

Отношение $\gamma / (\omega \varepsilon_a) = \operatorname{tg} \delta$ называют *тангенсом угла диэлектрических потерь* и относят к важнейшим параметрам диэлектриков.

Здесь γ – удельная электрическая проводимость; ω – угловая частота. На одной частоте ($\operatorname{tg} \delta < 0,01$) материал может считаться диэлектриком, на другой ($\operatorname{tg} \delta > 100$) – проводником.

При расчетах к идеальным диэлектрикам относят материалы, для которых $\operatorname{tg} \delta < 0,01$. На частотах, меньших $9 \cdot 10^6$ Гц, морскую воду относят к классу диэлектриков; на частотах, больших $9 \cdot 10^{10}$ Гц – к классу проводников. В промежуточной области $0,01 < \operatorname{tg} \delta < 100$ материал называют несовершенным диэлектриком, характеризующимся комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_c = \varepsilon_a - j\gamma / \omega = \varepsilon_a - j\varepsilon'$$

и комплексным волновым сопротивлением $z_c = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_c}$. Модуль комплексного

сопротивления

$$z_c = \sqrt{\mu_a / \sqrt{\varepsilon_a^2 + (\varepsilon')^2}},$$

а аргумент $\varphi_z = -0,5 \operatorname{arctg}(\varepsilon' / \varepsilon_a)$.

Значения ε_r и $\operatorname{tg} \delta$ различных сухих материалов приведены в табл. 1.1.

Для проводников мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости велика по сравнению с вещественной частью $\varepsilon' \gg \varepsilon_a$ и волновое сопротивление определяется выражением $z_c = \sqrt{\omega \mu_a / \gamma}$. С ростом частоты z_c увеличивается, и волны не могут глубоко проникать в проводник. Явление экранирования наружными слоями материала глубинных слоев от проникновения поля называют *скин-эффектом*. Он характеризуется глубиной проникновения плоской волны $\delta = \sqrt{2 / (\omega \gamma \mu_a)}$, на которой напряженность полей E и H уменьшается в e раз.

Скорость распространения электромагнитной волны в несовершенном диэлектрике зависит от частоты

$$V = c \sqrt{2 \left[1 + \sqrt{1 + (\varepsilon' / \varepsilon_a)^2} \right]^{-1}},$$

так как $\varepsilon' = \gamma / \omega$. Величина V характеризует скорость перемещения точек, сохраняющих одну и ту же фазу волны. Зависимость $V = f(\omega)$ называют *дисперсией*. В проводнике $V = \sqrt{2\omega / (\mu_a \gamma)}$. Через скорость находится длина волны $\lambda = VT_v$; $T_v = 1/v$; $v = \omega / (2\pi)$. Табл. 1.2 дает представление о значениях z_c , δ и λ проводящих материалов.

При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую по нормали к 'граничной поверхности формируется отраженная волна. При наложении обеих волн образуется *стоячая волна*, характеризующаяся *коэффициентом стоячей волны по напряжению* $k_{с\tau U} = E_{\max} / E_{\min}$ или *коэффициентом бегущей волны по напряжению* $k_{\delta U} = 1 / k_{с\tau U}$. Максимумы стоячей волны получают там, где дейст-

1.1. Диэлектрические свойства сухих материалов в диапазоне сверхвысоких частот

Материал	ϵ		$\text{tg} \delta \cdot 10^{-3}$		Плотность, г/см ³	Температура, °С
	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см		
Окись алюминия	9,6	9,2	0,02	0,08	1,4	20
Окись бериллия	6,5	6,8	0,02	0,08	1,4	25
Кремнезем	3,8	3,8	0,6	0,9	1,9	20
Окись магния	8,6	9,4	0,01	0,2	1,7	20
Полиэтилен	2,4	2,7	0,1	0,1	–	20
Тефлон	2,05	2,07	0,02	0,4	–	–
Полистирол	2,4	2,6	0,6	2	–	–
Плексиглас	2,5	2,7	6	8	–	–
Целлюлоза ацетатная	3,2	3,6	14	23	–	–
СаСО ₂	6,7	7,2	11	20	–	–
Плавленый кварц	3,4	3,9	0,1	0,1	–	–
Парафин	2,2	2,3	0,2	0,25	–	–
Бакелит	1,5	1,7	60	80	–	–
Цемент (новороссийский)	2,65	4,0	35	20	1,7	20
Нейлон	2,6	2,8	6	10	–	20
Лед	3,17	3,17	0,7	0,7	0,92	1
Снег	1,2	1,26	0,4	0,4	0,3	2
Растительный жир	2,2	2,2	40	50	–	20
Кирпич красный	3,4	3,7	25	30	1,7	–
Кирпич пористый	2,9	3,0	20	22	1,0	20
Кирпич силикатный	3,1	3,2	14	32	1,7	20
Гипс	2,65	2,8	5	7	1,8	20
Мел	2,2 ... 3,0	2,5 ... 3,2	11 ... 20	20 ... 35	1,0 ... 1,7	20
Пиритные огарки	2,2 ... 3,2	2,5 ... 3,7	30 ... 54	40 ... 45	1,0 ... 1,6	–
Асбест	1,8	2,0	40	60	1,1	–
Древесина (береза)	2,5	2,6	70	120	0,7	–
Дуб	3,1	3,6	40	90	0,82	–
Древесноволокнистые плиты	2,9	3,2	36	80	0,2	–
Сосна	2,6	2,8	20	40	0,5	–
Ель	2,6	2,8	14	36	0,4	–
Фанера (6 мм)	3,2	4,1	80	320	0,65	–
Нитрон	1,5	1,7	0,3	0,4	–	–
Лавсан	1,2	1,36	0,2	0,4	–	–
Винол	1,4	1,5	0,32	0,45	–	20
Капрон	1,2	1,3	0,4	0,51	–	–
Полипропилен	1,25	1,37	0,27	0,36	–	–
Антрацит	4,6	5,6	3	4,8	1,4	–
Хлопок-сырец	2,2	2,6	0,35	0,38	0,06	–

Продолжение табл. 1.1

Материал	ε		$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$		Плотность, г/см ³	Температура, °С
	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см		
Войлок шерстяной	3,1	3,4	6	8	0,25	–
Глина огнеупорная	4,2	4,8	3	6	1,8	–
Каолин	3,2	3,7	0,48	0,8	1,7	–
Карбоксилметилцеллюлоза	3,2	3,8	0,25	0,76	0,4	–
Аглопорит	2,4	2,9	2,8	7	0,7	–
Керамзит	2,1	2,3	3,2	8	0,5	–
Гравий	1,8 ... 2,3	2,1 ... 2,6	0,3 ... 0,6	0,4 ... 0,8	1,4 ... 1,9	–
Грунт-суглинок	3,2	3,8	7	8,9	1,9	–
Грунт песчаный	3,6	4,1	3	5	1,4	–
Доломит	3,2	3,4	2,7	3,1	2,6	–
Линолеум	4,6	5,8	61	320	1,1	–
Магнезия (порошок)	2,9	3,6	5,2	20	0,4	–
Минеральная вата	1,8	1,9	0,9	1,1	0,1	–
Минераловатная плита	4,2	4,6	5	9	0,4	–
Мрамор	2,1	2,4	0,36	0,5	2,7	–
Шамот ШС-4	–	3,6	–	12,7	–	20
Бакор-33	–	7,4	–	41,8	–	300
Пенопласт	1,6	1,7	0,3	0,36	0,03	–
Пеностекло	2,6	2,9	0,46	0,63	0,3	20
Песок речной	2,1	3,0	1,2	2,1	1,5	–
Песок кварцевый	2,0	2,1	1,1	1,6	1,3	–
Гуттаперча	2,4	2,3	6	5	–	–
Пчелиный воск	2,3	2,3	5	4,8	–	–
Красное дерево	1,7	1,7	27	29	–	–
Мыло	2,9	3,1	110	170	–	–
Мясо (натуральное)	40	30	330	370	–	–
Поваренная соль	6,0	6,0	0,2	0,2	–	–
Фарфор литой	5,6	5,5	13	15	–	–
Фарфор прессованный	5,0	5,1	9	15	–	–
Стекло	5,1 ... 7,2	5,1 ... 7,2	10 ... 22	10 ... 24	–	–
Бакелит (плиточный)	3,7	3,6	43	41	–	–
Каучук	2,3	2,3	3	3	–	–
Слюда	1,6	1,6	0,21	0,22	–	–
Сланцы эстонские	3,1	3,4	5,2	5,8	–	–
Торф фрезерный	3,2	3,8	7,1	8,9	–	–

Продолжение табл. 1.1

Материал	ϵ		$\text{tg} \delta \cdot 10^{-3}$		Плотность, г/см ³	Температура, °С
	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см	$\lambda = 10$ см	$\lambda = 3$ см		
Горфоплиты	2,9	3,1	20	28	–	–
Фаянс	4,6	4,8	7	8,2	–	–
Лен	2,1	3,2	40	65	0,09	–
Известняк	3,8	4,3	54	62	1,4	–
Кожа	4,6	5,2	35	72	0,7	–
Кокс	4,8	5,1	20	22	0,5	–
Асфальтобетон	3,6	4,3	65	91	2,1	–
Тяжелый бетон	4,1	4,5	8	11	2,7	–
Пенобетон	3,1	3,1	4	4	0,3	20
Нефть сырая	4,2	4,4	88	62	–	–

1.2. Параметры проводящих материалов на частоте 10^{10} Гц

Материал	Удельная проводимость, МСм/м	Длина волны, мкм	z_c , Ом	δ , мкм
Медь	58	4,2	0,037	0,66
Алюминий	37,2	5,14	0,046	0,82
Вольфрам	18,1	7,41	0,066	1,18
Нихром	1,0	31,5	0,281	5,03
Графит	0,125	89,5	0,795	14,25

вующие значения напряженности падающей и отраженной волн складываются, а минимумы там, где они вычитаются. Следовательно,

$$k_{\delta U} = \frac{1}{k_{\text{ст}U}} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}, \quad |\rho| = \frac{1 - k_{\delta U}}{1 + k_{\delta U}},$$

где ρ – коэффициент отражения. В теории длинных линий этот коэффициент выражается через волновые сопротивления первой z_{c1} и второй z_{c2} сред:

$$\rho = (z_{c2} - z_{c1}) / (z_{c2} + z_{c1}).$$

Электромагнитная волна представляет собой совокупность быстропеременных электрического E и магнитного H полей,

распространяющихся в определенном направлении z .

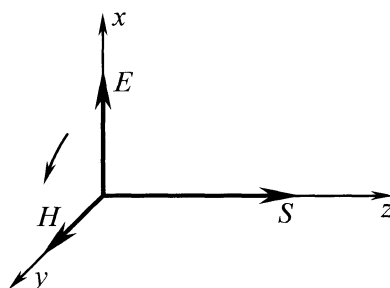


Рис. 1.2. Схема расположения векторов E , H и S в бегущей электромагнитной волне

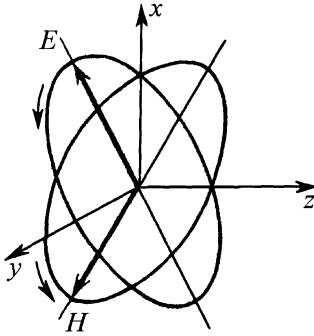


Рис. 1.3. Схема эллиптической поляризации

При радиоволновом контроле диэлектрических материалов необходимо знать диэлектрическую постоянную ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ (обычно для диэлектриков магнитная проницаемость $\mu = 1$), для полупроводников и магнитных материалов необходимо учитывать ϵ и μ , для металлов в основном имеет значение величина проводимости σ .

В неограниченной диэлектрической среде без потерь $\mu = 1$; $\sigma = 0$, наличие магнитной составляющей поля связано с существованием электрической составляющей E , играющей основную роль в современных средствах контроля.

Одним из важнейших параметров электромагнитной волны является ее поляризация, определяемая ориентацией вектора E в пространстве по мере ее распространения. Волну называют естественной (неполяризованной), если вектор E принимает в плоскости, перпендикулярной к направлению ее распространения, в

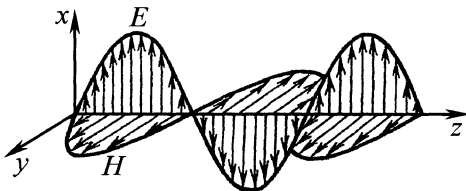


Рис. 1.4. Схема распространения плоскополяризованной электромагнитной волны

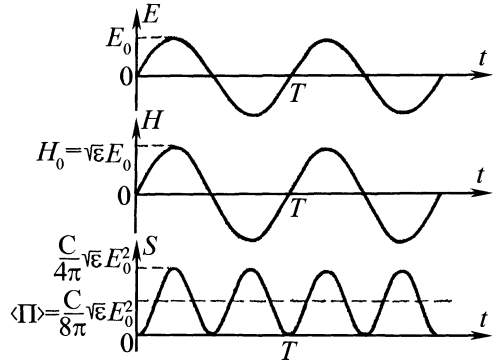


Рис. 1.5. Изменение во времени значений E , H и S в бегущей волне

различные моменты времени различные направления, а конец его описывает окружность. Если при тех же условиях конец вектора описывает эллипс, то волну называют частично поляризованной по эллипсу. Когда вектор E равномерно вращается (влево и вправо) вокруг направления распространения, а конец его описывает эллипс, то волну называют поляризованной по эллипсу (влево и вправо) (рис. 1.3). В частных случаях эллипс вырождается в окружность (волна поляризована по кругу) или прямую линию (плоско поляризованная волна).

В свободной волне E и H софазны, т.е. они одновременно в одних и тех же точках пространства достигают максимального или минимального значения (рис. 1.4.). Аналогичная картина получается, если вместо z отложить время t . Векторы E и H всегда образуют правый винт, что определяет направление распространения энергии и очень важно при анализе условий отражения.

Поток энергии S ортогонален векторам E и H и совпадает с направлением распространения волн z . Поток энергии колеблется с удвоенной частотой по сравнению с E и H (рис. 1.5), принимая положительные значения.

Плотность потока энергии пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля. Это общее и важное поло-

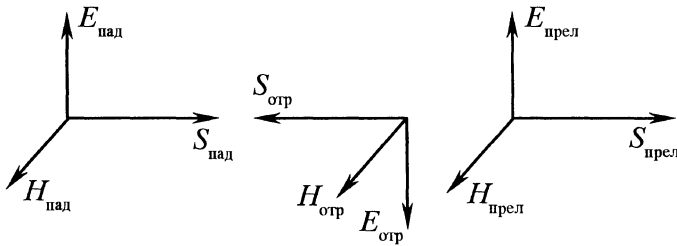


Рис. 1.6. Векторы E , H и S в падающей, отраженной и преломленной волнах при прохождении из среды оптически менее плотной в оптически более плотную ($n_2 > n_1$)

жение, на котором фактически основана возможность регистрации распространяющихся электромагнитных волн различными приемниками, так как из-за инерционности приемники энергии СВЧ регистрируют средние значения квадрата амплитуды E^2 .

При наличии границы раздела появляется отраженная волна, взаимодействующая с падающей и образующая в первой среде (рис. 1.6) стоячую волну, для которой как во времени, так и в пространстве имеет место сдвиг фаз $\Delta\varphi = \pi/2$ между векторами E и H .

Узлы и пучности векторов E и H разнесены пространственно, и расстояние между ними равно $\lambda/4$. В любом узле вектор $S = [EH]$ обращается в нуль, т.е. энергия не распространяется вдоль z .

Измеряя расстояние между узлами (или пучностями) электрической напряженности, находят значения длины волны.

1.3. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ РАДИОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ, ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНИКИ СВЧ

Источники. Колебания СВЧ могут быть получены с помощью генераторов магнетронного типа, ламп обратной волны, отражательных клистронов, квантово-механических генераторов и полупроводниковых приборов. Наибольшее применение находят клистроны, затем следуют магнетроны, лампы обратной волны и полупроводниковые генераторы.

Отражательные клистроны широко применяют в качестве задающих генераторов в радиолокационных станциях, в усилительных цепочках маломощных передатчиков, в радиорелейных линиях связи, маломощных генераторах СВЧ непрерывного или импульсного излучения в передающих устройствах малого радиуса действия (радиодальномеры, радиомаяки, ответчики), а также как маломощные генераторы в измерительной и малогабаритной аппаратуре благодаря ряду преимуществ перед другими маломощными генераторами СВЧ. Это, в частности, низкий уровень флуктуационных шумов, простота эксплуатации и высокая надежность при изменении в широких пределах условий эксплуатации. Выпускаемые отражательные клистроны малой мощности (до 100 мВт) перекрывают широкий диапазон длин волн, вплоть до субмиллиметровых. Клистроны некоторых типов требуют принудительного воздушного охлаждения, особенно предназначенные для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона, когда принципиально трудно повысить их КПД. К сожалению, тепловые уходы частоты преобладают над всеми другими и присущи любому типу генераторов СВЧ.

Магнетронные генераторы охватывают широкий диапазон частот и обеспечивают большой диапазон мощностей в импульсе: от единиц ватт до десятков мегаватт. Они находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре в качестве

задающих генераторов, источников мощности СВЧ и т.д. Однако в последнее время намечается отказ от их широкого использования вследствие большой нестабильности генерируемой частоты и тепловых уходов частоты. Кроме того, наличие постоянных магнитов увеличивает массу магнетронов, для питания требуются высокое напряжение и интенсивное охлаждение (путем обдува) резонатора.

Лампы обратной волны (ЛОВ) относятся к классу широкодиапазонных генераторов колебаний СВЧ с электронной перестройкой частоты. Выпускается большое число типов ЛОВ, перекрывающих диапазон волн от 60 см до десятых долей миллиметра. Для фокусировки электронного луча в ЛОВ в основном применяют постоянные магниты трубчатой формы. Такие ЛОВ выпускаются в виде пакетированной конструкции, в которой объединены корпус ЛОВ, постоянный магнит и юстирующее приспособление. Поэтому нормальная работа ЛОВ может быть нарушена при наличии внешних магнитных полей или расположенных поблизости от ЛОВ ферромагнитных материалов. Как правило, расстояние между ЛОВ и подобными материалами должно быть не менее 400 мм. Режим работы ЛОВ сильно зависит от внешних условий (температуры, влажности), а также согласования с нагрузкой.

Лампы обратной волны особенно чувствительны к изменению температуры среды. При воздействии на ЛОВ механических ударов и вибраций происходят периодические изменения расстояния между отдельными электродами электронной пушки либо их поперечные смещения относительно друг друга, что сопровождается амплитудной и частотной модуляцией генерируемых колебаний. Девиация частоты ЛОВ при вибрациях обычно несколько больше, чем у клистронов. К недостаткам ламп данного типа относится также то, что ЛОВ, находящиеся на хранении и длительное время (более двух

месяцев) не включающиеся, должны быть подвергнуты тренировке, которая занимает не менее 1,5 ч. Генераторы на основе ЛОВ, как и все генераторы СВЧ с широким диапазоном электронной перестройки частоты, не обладают высокой стабильностью частоты при работе в какой-либо точке диапазона.

Эффективный автогенератор сантиметровых и миллиметровых волн создан на полупроводниковом эквиваленте отражательного клистрона – *лавинно-пролетном диоде* (ЛПД), который служит основой ряда устройств СВЧ (генераторов, усилителей, преобразователей частоты).

В основе работы ЛПД лежит эффект генерации когерентных колебаний при лавинном пробое полупроводниковых диодов СВЧ. Получаемая при этом мощность колебаний в непрерывном режиме составляет для различных диодов от десятков микроватт до нескольких милливатт при длине волны 0,8 ... 10 см. Генератор состоит из лавинно-пролетного диода и полого резонатора, связанного с полезной нагрузкой. Характерная особенность ЛПД – повышенный уровень шума на высоких (> 10^4 МГц) частотах. Даже в германиевых диффузионных ЛПД с однородным пробоем этот уровень на 25 ... 30 дБ превышает дробовой шум вакуумного диода с таким же током. В кремниевых ЛПД, где пробой сопровождается микроплазменными явлениями, уровень шума может превышать на 60 ... 70 дБ дробовой шум.

Малогобаритные генераторы сантиметрового диапазона (3 ... 15 ГГц) обеспечивают в непрерывном режиме при токе питания 10 ... 20 мА и напряжении 20 ... 70 В выходную мощность от 5 до 50 мВт при КПД 3 ... 7 %. Значительный уровень высших гармоник в спектре лавинного тока позволяет использовать ЛПД сантиметрового диапазона волн для создания генераторов миллиметрового диапазона. Резонатор такого генератора целесообразно делать двух- или трехконтурным, с тем

1.3. Сравнительная характеристика некоторых типов генераторов СВЧ

Тип генератора	Режим работы	Диапазон* длин волн, мм	Мощность** излучения, Вт	КПД**, %
Отражательный клистрон	Непрерывный	2 ... 100	0,1	2
Генераторный лавинно-пролетный диод (ГЛПД)	Непрерывный	8 ... 100	0,05	3 ... 7
Генератор на диоде Ганна	Непрерывный	8 ... 100	0,65	6
То же	Импульсный (10^{-7} с)	8 ... 100	200	14

*Диапазон перекрывается рядом приборов.

**Данные относятся к максимально достижимым значениям мощности и КПД.

чтобы один из контуров, не связанный с полезной нагрузкой, был настроен на основную частоту в коротковолновой части сантиметрового диапазона (10 ... 15 ГГц), а остальные – на высшие гармоники. Генераторы этого типа имеют в верхней части миллиметрового диапазона выходную мощность (в непрерывном режиме) порядка единиц милливольт. Однако спектральная плотность флюктуаций амплитуды и частоты ЛПД на 15 ... 20 дБ выше, чем у отражательных клистронов. Итак, СВЧ-устройства на ЛПД обладают такими преимуществами, как малые габариты, масса, экономичность питания и т.д. Основным их недостаток – высокий уровень шумов.

Созданы и получили также практическое применение полупроводниковые генераторы СВЧ на *диодах Ганна*. Они работают при низких напряжениях питания (4 ... 8,5 В), потребляя при этом ток от 0,4 до 1,5 А (см. табл. 1.3).

Направляющие системы. В приборах, связанных с излучением радиоволн, энергия от генераторов к антенне или от антенны к приемнику передается с помощью направляющих систем. Электромагнитные волны направляются проводящими или изолирующими поверхностями, образующими каналы электромагнитной

энергии в пространстве между ними. На рис. 1.7 схематически изображены основные типы направляющих систем. На практике в приборах НК чаще всего используют *прямоугольные волноводы*. В прямоугольном волноводе может распространяться большое число типов магнитных H_{mn} и электрических E_{mn} волн, причем преимущественное распространение волн того или иного типа зависит от размеров волновода, частоты и метода возбуждения. Индексы m и n характеризуют число стоячих полуволн, укладываемых на широкой стороне a и узкой стороне b поперечного сечения волновода соответственно. Например, для волны H_{10} $m = 1$ и $n = 0$; на стороне волновода a укладывается одна стоячая полуволна, на стороне b поле однородно. Это отмечается индексом "0" при указании типа волны. Вдоль оси волновода поле распределено по закону бегущей волны.

При передаче энергии по волноводу обычно стремятся к тому, чтобы волновод работал на волне одного типа. Практически это достигается выбором размеров волновода в соответствии с условиями $a < \lambda < 2a$; $\lambda > 2b$. Волна H_{10} обладает наименьшей критической частотой, при ее распространении по волноводу отсут-

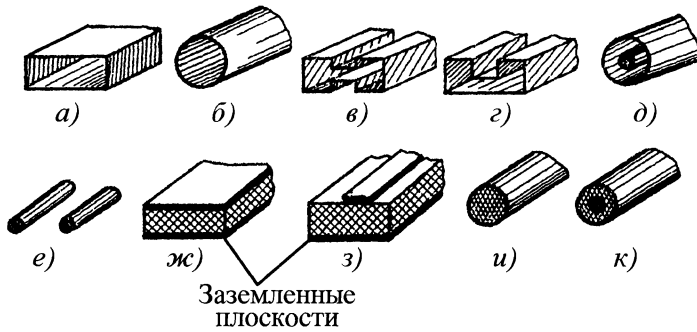


Рис. 1.7. Основные типы применяемых на практике направляющих систем:

a – прямоугольный волновод; *б* – круглый волновод; *в, з* – волноводы сложного профиля; *д* – коаксиальный волновод; *е* – двухпроводная линия; *ж, з* – полосковые линии; *и, к* – диэлектрические волноводы

вуют другие типы волн, поэтому она называется волной основного типа для прямоугольного волновода.

Критическая длина волны H_{10} в волноводе $\lambda_{кр} = 2a$, при этом длина волны в волноводе $\lambda_{в}$ отличается от длины волны λ в свободном пространстве:

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}$$

Основные характеристики прямоугольных волноводов приведены в табл. 1.4.

1.4. Характеристики прямоугольных волноводов

Сечение волновода, мм		Предельные значения		Рабочие значения		Затухание, дБ/м
Ширина	Высота	Частота, ГГц	Длина, см	Частота, ГГц	Длина, см	
47,5	22,15	3,155	9,31	3,95 ... 5,85	7,6 ... 5,13	0,45
40,0	20,0	3,71	8,00	4,9 ... 7,65	6,12 ... 4,25	0,53
35,0	15,0	4,28	7,0	5,85 ... 8,2	5,13 ... 3,66	0,73
28,5	12,6	5,26	5,7	7,05 ... 10,0	4,25 ... 3,0	1,0
23,0	10,0	6,56	4,57	8,2 ... 12,4	3,66 ... 2,42	1,38
19,0	9,5	7,87	3,81	10,0 ... 15,0	3,0 ... 2,0	1,67
16,0	8,0	9,5	3,16	12,4 ... 18,0	2,42 ... 1,67	2,2
13,0	6,5	11,57	2,59	15,0 ... 22,0	2,0 ... 1,36	2,9
9,0	4,5	17,4	1,73	22,0 ... 33,0	1,36 ... 0,91	5,5
7,2	3,4	21,1	1,43	26,5 ... 40,0	1,13 ... 0,75	7,4

По волноводу волна может распространяться в двух направлениях: от генератора к нагрузке и от нагрузки к генератору; первую волну называют падающей или прямой, вторую – отраженной или обратной. Если нагрузка полностью потребляет переносимую падающей волной энергию, говорят, что она согласована с волноводом. Если нагрузка потребляет переносимую падающей волной энергию лишь частично (вследствие чего появляется отраженная волна), говорят, что нагрузка не полностью согласована с волноводом. Режим работы волновода определяется интерференцией падающей и отраженной волн (в данном случае одного основного типа колебаний). При этом поле в волноводe можно рассматривать как результат наложения полей двух волн: бегущей, участвующей в передаче энергии от генератора к нагрузке, и стоячей, не участвующей в передаче энергии.

На рис. 1.8 показано распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода для основного типа волн. Распределение электрического поля может быть экспериментально измерено с помощью волноводной измерительной линии, представляющей участок с перемещающимся по продольной щели в широкой стенке волновода приемным штырем.

Анализ режима работы волновода имеет существенное значение при согласовании его с нагрузкой. Сущность согласования заключается в том, что в волновод вносится дополнительная неоднородность, которая создает отраженную волну, компенсирующую волну, отраженную от нагрузки.

В заключение отметим, что прямоугольные волноводы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами волноводов. Поэтому они получили наибольшее распространение. В частности, в прямоугольных волноводах деформации стенок меньше влияют на структуру поля, чем в круглых. Применяют прямоуголь-

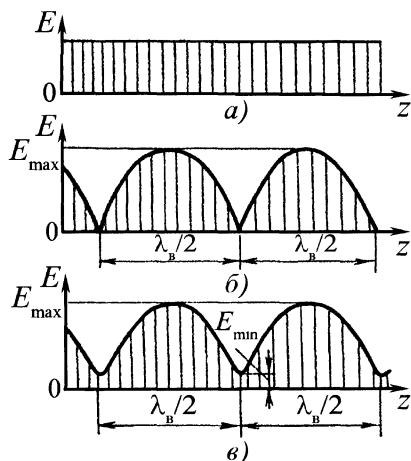


Рис. 1.8. Распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода:

a – в режиме бегущей волны; *б* – в режиме стоячей волны; *в* – в смешанном режиме

ные волноводы главным образом на сантиметровых и миллиметровых волнах.

Диэлектрические волноводы (см. рис. 1.7, *и, к*) находят все более широкое применение. Если размеры сечения волновода примерно равны длине волны или несколько меньше ее, значительная доля энергии, распространяющейся вдоль него волны, сосредоточена в диэлектрике, а скорость ее распространения меньше скорости света (случай замедления). При этом волновод может подвергаться изгибам с радиусом $10 \dots 20 \lambda$ без появления заметного излучения. Технология изготовления диэлектрических волноводов проще, чем металлических полых. Сочленение диэлектрического и металлического полого волноводов чрезвычайно простое: достаточно конец диэлектрического волновода вставить в металлический.

Полосковые волноводы, несмотря на значительную перспективу, еще редко используются в приборах неразрушающего контроля, в основном из-за сложной дорогой технологии, отсутствия простых

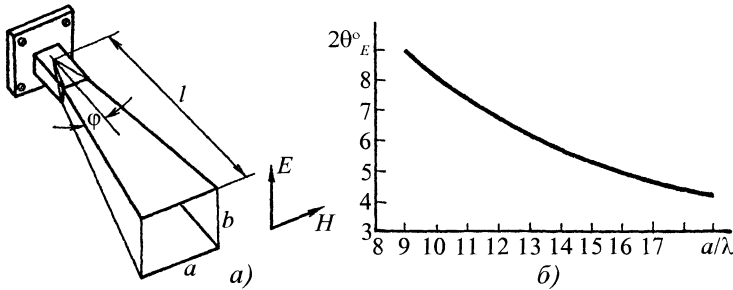


Рис. 1.9. Рупорная антенна (а) и зависимость ее ширины диаграммы направленности от размеров (б)

регулируемых элементов в полосковом исполнении, сложной методики проверки параметров.

Передающие и приемные антенны.

Для излучения и приема радиоволн используют *антенны* (от лат. antenna – мачта, рей). Антенны диапазона СВЧ характеризуют апертурой – раскрывом (выраженным обычно через длину волны излучения), а также диаграммой направленности, КПД и другими параметрами.

Передающие антенны стремятся делать остронаправленными, чтобы получить высокую локальность контроля объектов. Приемные антенны должны обеспечивать наилучшие условия приема энергии радиоволн СВЧ, приходящих от ОК. Как передающие, так и приемные антенны, по возможности, должны быть согласованы с внешним пространством и волноводным трактом, чем достигаются оптимальные условия передачи электромагнитной энергии от генератора к ОК и от ОК к приемнику. Во многих случаях один и тот же тип антенны может быть использован и для излучения, и для приема.

Рупорная антенна представляет комбинацию отрезка волновода постоянного сечения и собственно рупора (рис. 1.9). Частный случай рупорной антенны – *открытый конец волновода*.

Рупорные антенны формируют на выходе сферическую волну, распространяющуюся вдоль оси рупора. Излучение

рупорной антенны можно рассматривать как прохождение электромагнитных волн через отверстие в экране (раскрыв рупора) с учетом дифракции. Характеристики полей излучения рупорной антенны (диаграмма направленности, коэффициент усиления и др.)⁷ определяются размерами рупора: длиной l , размерами раскрыва a , b и углом ϕ . Все эти параметры взаимосвязаны, и изменение одного из них ведет к изменению других. Учет этой зависимости необходим при расчете рупоров, диаграмма направленности которых соответствует расчетной. Диаграмма направленности рупорной антенны имеет вид сигарообразного тела, это так называемые игольчатые диаграммы. Толщина "сигары" зависит от формы и размеров рупора, типа волны, длины рупора. Требуемая диаграмма направленности обеспечивается, если в раскрыве (на выходе антенны) создается плоская волна, для чего необходима большая длина рупора (при этом сферическая волна в раскрыве мало отличается от плоской), т.е. необходимо выполнение условия: $l > (ab)/(2\lambda)$, где λ – длина волны. Для такой антенны лучшая направленность имеет место при постоянном амплитудном распределении поля в раскрыве. Однако это условие выполнить трудно, так как в рупоре в основном сохраняется то же распределение амплитуд, что и в поперечном сечении волновода: постоянная амплитуда в плоскости E , а в

плоскости H амплитуда распределена по закону косинуса с максимумом в середине широкой стенки.

На диаграмму направленности влияет дифракция на внешних краях антенны, ухудшая ее, поэтому для ослабления этого влияния раскрыв рупора следует увеличивать. Чем больше раскрыв, тем меньше расходится луч. При выполнении условия $l \geq (ab)/(2\lambda)$ выражение для диаграммы направленности рупорной антенны в двух главных плоскостях (H и E) для $\theta < 30^\circ$ имеет вид:

$$F_E(\theta) \approx \frac{\sin(\pi b \sin \theta / \lambda)}{\pi b \sin \theta / \lambda},$$

$$F_H(\theta) \approx \frac{\cos(\pi a \sin \theta / \lambda)}{1 - 2a / \lambda \sin \theta},$$

где θ – угол между направлением наблюдения и оптической осью излучения энергии. При оптимальных размерах рупора максимален коэффициент усиления G :

$$b = 0,8a; \quad l = 0,3a^2/\lambda; \quad G = 6ab/\lambda^2.$$

На рис. 1.9, б представлена расчетная зависимость ширины диаграммы направленности рупорной антенны для указанных параметров: $2\theta_E \approx (53\lambda/a)^\circ$. С помощью рупорной антенны нельзя получить сечение луча меньше размеров раскрыва рупора, поэтому с учетом влияния ближней зоны сечения луча на расстоянии L от края рупора определяют из соотношения

$$\delta_{01} = ab + \theta_{0,1}(L - L_0),$$

где $\theta_{0,1}$ – ширина диаграммы направленности на уровне $0,1P_{\max}$; L_0 – протяженность ближней зоны ($L > L_0$).

Диэлектрические антенны представляют сплошные стержни или трубки круглого либо прямоугольного сечения из диэлектрика длиной в несколько длин волны с поперечным сечением, соизмеримым с λ . Они относятся к классу *антенн бегущей волны*. Благодаря тому что в стержнях устанавливается бегущая волна, диэлектрические антенны имеют осевое (продоль-

ное) излучение. Антенна состоит из диэлектрического стержня и металлического волновода, в который вставляется один из концов стержня (рис. 1.10, а).

Излучение диэлектрической антенны зависит от длины, поперечных размеров стержня и свойств диэлектрика. На форму диаграммы направленности такой антенны большое влияние оказывает тип волны. Симметричные волны не дают излучения вдоль оси стержня. Концентрирование энергии вдоль оси возможно, если отдельные элементы стержня совпадают с осью. Это в свою очередь выполняется, если преобладает поперечная составляющая токов смещения в стержне. Наиболее благоприятны волны H_{11} (для круглого сечения) и H_{10} (для прямоугольного).

В диэлектрическом стержне электромагнитная волна распространяется со скоростью $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$, где c – скорость света; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня. При уменьшении площади сечения стержня скорость распространения приближается к скорости света.

Максимальное излучение антенны направлено вдоль оси стержня, если размер и материал стержня подобраны так, что скорость распространения волны вдоль стержня приближается к скорости света. Для удовлетворения этих требований площадь S сечения стержня должна быть в пределах:

$$\frac{\lambda_0^2}{10(\epsilon_r - 1)} \leq S \leq \frac{\lambda_0^2}{4(\epsilon_r - 1)}.$$

Нарушение этого условия ведет к росту бокового излучения (боковых лепестков) при увеличении сечения или к расширению главного лепестка диаграммы направленности при уменьшении сечения.

Соотношение можно записать через поперечные размеры стержня:

$$\frac{\lambda}{\sqrt{2,5\pi(\epsilon_r - 1)}} \leq d \leq \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\epsilon_r - 1)}}.$$

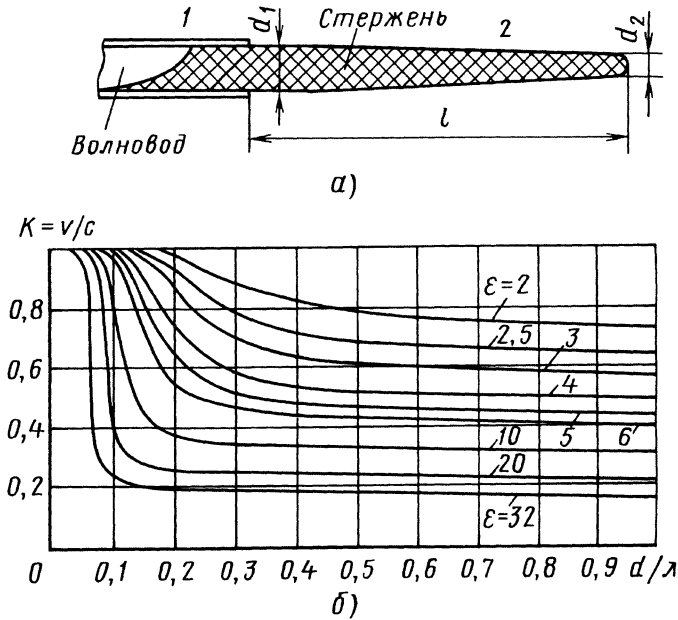


Рис. 1.10. Диэлектрическая антенна (а) и графики для определения коэффициента замедления (б): 1 – металлический волновод; 2 – диэлектрический стержень

При расчете диэлектрических антенн важным параметром является коэффициент замедления $K = v/c$, значения которого определяются графиками рис. 1.10, б.

При заданных значениях λ и K оптимальная длина стержня $l_{\text{opt}} = \lambda K / (2\sqrt{1-K})$. Практически длина стержня влияет на ширину диаграммы направленности до значений $l \approx (6 \dots 8)\lambda$. При больших l основной лепесток диаграммы направленности изменяется мало, но начинают возрастать боковые лепестки. Для лучшего согласования антенны со свободным пространством стержень обычно делают конусообразным, чтобы скорость волны v на конце стержня приближалась к скорости света c .

Исследования показывают, что с помощью диэлектрических антенн можно получить удовлетворительные диаграммы

направленности с шириной луча не менее $20 \dots 22^\circ$. При этом имеет место значительный выигрыш в размерах по сравнению с рупорными антеннами.

Фокусирующие антенны (эллиптические, линзовые, гиперболические и др.) используют в приборах НК значительно реже, поскольку они сложны в изготовлении, имеют крупные габаритные размеры и массу, нуждаются в первичном облучателе, как правило рупоре. Однако фокусирующие линзы нередко используют для компенсации дифракции простых рупорных антенн.

Развязывающие элементы. Для развязки различных участков волноводного тракта между собой и прежде всего для развязки генератора СВЧ с нагрузкой применяют различные развязывающие устройства: вентили, циркуляторы, аттенюаторы и т.п.

Основные характеристики *вентиля* – устройства для передачи энергии СВЧ только в одном направлении: полоса рабочих частот, вносимые потери в прямом направлении, затухание в обратном направлении, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе в полосе рабочих частот, температурная зависимость параметров, а также габаритные размеры и масса. Качество развязки вентиля можно характеризовать *вентильным отношением (добротностью)* – отношением мощности затухания обратной волны к мощности потерь прямой.

Для создания вентиляей используют ферритовые пластины, помещенные в волноводе. Наиболее широко применяют *резонансный вентиль* на прямоугольном волноводе. Он представляет собой отрезок волновода, в котором тонкая поперечно-намагниченная ферритовая пластина расположена в плоскости, перпендикулярной широким стенкам волновода и, как правило, соприкасается с металлической стенкой волновода, что улучшает рассеяние энергии, поглощаемой ферритом. В резонансных вентилях используется явление необратимого резонансного поглощения в феррите. Резонансные вентили на прямоугольном волноводе обладают широкой полосой пропускания частот и позволяют рассеивать значительную энергию.

Вентиль на эффекте смещения поля – это обычно отрезок прямоугольного волновода, в котором находится толстая ферритовая пластина, покрытая с одной стороны поглощающим слоем. Снаружи волновода размещается постоянный магнит, создающий поперечное магнитное поле. В таком вентиле используются физические явления, вызывающие различия в структуре поля прямых и обратных волн. Напряженность электрического поля прямой волны в месте расположения пленки поглощающего слоя минимальная, поэтому поглощающий слой оказывает на нее слабое влияние, в то время как обратная волна интенсивно затухает в поглощаю-

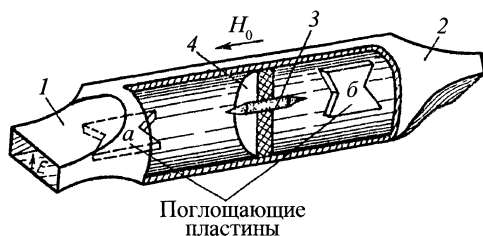


Рис. 1.11. Вентиль на эффекте Фарадея:

- 1, 2 – соответственно входное и выходящее плечи; 3 – ферритовый стержень;
- 4 – диэлектрический держатель

щем слое. Магнитная система вентиля на смещении поля проще по конструкции, а габариты и масса ее меньше, чем у резонансного вентиля, поскольку в вентиле на смещении поля не требуется высокой напряженности магнитного поля.

Вентили на смещении поля наиболее пригодны для использования при малых уровнях передаваемой по волноводу мощности и в случаях, когда потери в прямом направлении должны быть очень малыми ($\approx 0,1$ дБ).

Вентили, использующие эффект Фарадея, обычно позволяют получить в трехсантиметровом диапазоне вентильное отношение около 30 дБ и потери прямой волны меньше 0,5 дБ в полосе около 10 %. Вектор электрического поля прямой волны (плечо 1 на рис. 1.11.) перпендикулярен поглощающим пластинам, а вектор обратной (отраженной) волны параллелен им, поэтому волна интенсивно поглощается пластиной *а*. Другая поглощающая пластина *б* служит для компенсации вторичных переотражений от плеча 2.

В качестве развязывающих элементов применяют также *циркуляторы* – устройства в виде системы волноводных каналов и расположенных внутри них ферритовых элементов. Электромагнитные волны распространяются из одного канала в другой только в определенной последовательности. На рис. 1.12 представлена схема Y-циркулятора, состоящая из трех соединенных между собой под углом 120° прямо-

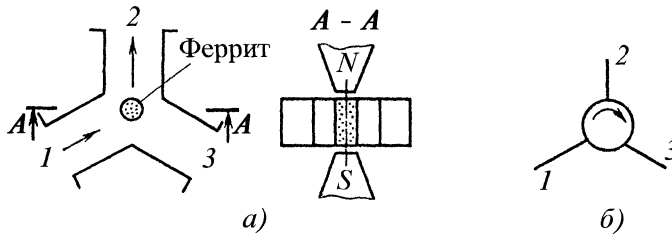


Рис. 1.12. Y-циркулятор:

а – устройство; б – схема передачи энергии

угольных волноводов. В центральной части расположен ферритовый цилиндр достаточно большого диаметра, снаружи – постоянный магнит.

Принцип работы Y-циркуляторов основан на искажении картины высокочастотного поля в феррите, которое имеет ту же природу, что и в устройствах со смещением поля. Электрическое и магнитное поля образуют такую комбинацию, при которой вектор Пойнтинга существует во входном плече 1 и в выходном плече 2, а в плече 3 он равен нулю. Таким образом, энергия, подведенная в плечо 1, поступает на плечо 2 и не проходит в плечо 3. В силу симметрии энергия из плеча 2 попадает в плечо 3 и не поступает в плечо 1, т.е. Y-циркулятор пропускает волны в направлении $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$.

Простота конструкции, малые размеры и масса, перекрытие диапазона СВЧ вплоть до миллиметровых волн обеспечили широкое практическое применение Y-циркуляторов. В настоящее время разработаны Y-циркуляторы для различных диапазонов длин волн с развязкой не менее 20 дБ в полосе 10 ... 20 % для рабочих температур от -60 до $+60$ °С при КСВН не более 1,2. Они могут быть использованы вместо обычных ферритовых резонансных вентилях, для чего плечо 3 нагружается на согласованную нагрузку с $k_{стU} \approx 1,01$.

Иногда в качестве развязывающих элементов используют *аттенюаторы* – отрезки волноводов с перемещающейся

поперек широкой стенки поглощающей пластиной. Недостаток аттенюаторов в том, что происходит потеря энергии прямой волны. Для уменьшения переотражений концы поглощающей пластины делают заостренными.

Фазовращатели широко используют в измерительных схемах, для фазовой автоподстройки, фазовой компенсации, установки фазы и т.д. В классических конструкциях в волновод вводят диэлектрическую пластину из высококачественного диэлектрика, что приводит к изменению фазовой постоянной волны на регулируемом участке волновода. Перемещать пластину можно вручную или с помощью электромеханического привода через профилированный кулачковый механизм. Чем больше ϵ_r материала пластины, тем больше фазовый сдвиг проходящей волны. Обычно максимальный фазовый сдвиг в регулируемых фазовращателях достигает $180 \dots 360^\circ$.

Другой распространенный тип фазовращателя – *сжатая линия*, представляющая собой прямоугольный волновод с щелью, прорезанной посередине широкой стенки с обеих его сторон. При сжатии волновода происходит изменение длины волны $\lambda_{кр} = 2a$ и как следствие – изменение длины λ_v .

Нередко для фазового сдвига волны применяют Y-циркуляторы с регулируемым короткозамкнутым поршнем. Поршень при этом подключают к плечу 2

циркулятора (см. рис. 1.12), и фаза волны, проходящей из плеча 1 в плечо 3, меняется на величину $\Delta\varphi = 2 \frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta l_{кз}$, где $\Delta l_{кз}$ – изменение положения поршня.

При необходимости увеличения скорости изменения фазы (случай фазовой модуляции) применяют электрически управляемые фазовращатели на ферритовых или полупроводниковых элементах.

Элементы волноводной техники.

Отрезки волноводного тракта или волноводные секции соединяют с помощью плоских контактных или дроссельных фланцев.

Плоские контактные фланцы применяют в тех узлах тракта, которые не подвергаются частой разборке. Для получения хорошего КСВН (около 1,002) необходимо соблюдать высокую точность обработки контактных поверхностей фланцев. Между фланцами двух секций иногда размещают контактную прокладку, изготовленную из бронзы, меди или алюминия. Контакт достигается с помощью пружинных лепестков, расположенных по внутреннему периметру пластины.

Дроссельные фланцы используют в местах, где возможны небольшие взаимные смещения секций или часто осуществляется разборка узла. Большинство дроссельных соединений основано на применении короткозамкнутой поперечной передающей линии: короткое замыкание, трансформированное в плоскость сочленения, поддерживает непрерывность электрического контакта в соединении, несмотря на наличие там конструктивного зазора. При конструировании волноводных трактов часто возникает необходимость в *изгибах и скрутках* волноводов, в различных *уголках*. Резкие изгибы тракта вызывают большие отражения, поэтому обычно используют плавные изгибы. Оптимальные их характеристики получают в том случае, если длина изгиба составляет целое число длин поперечной волны в волноводе. Полоса пропускания частот составляет при этом около 10 %, а КСВН менее 1,05.

Прямоугольные изгибы выполняют, как правило, в *E* и *H*-плоскостях (одноуголковые соединения). Более широкополосны уголки с двойным поворотом на 45° (двухугольные соединения). В этом случае отражения, возникающие от одного поворота, компенсируются отражениями от другого. КСВН для этих соединений не превышает 1,05.

С помощью *волноводной скрутки* можно изменить плоскость поляризации, т.е. направление вектора напряженности электрического поля в волноводе. При этом наилучшее согласование получается при длине скрутки, равной нескольким длинам поперечной волны в волноводе. Полоса пропускания скрученного участка волновода около $\pm 6\%$ от номинальной частоты, КСВН не превышает 1,1.

Для соединения волноводов различных размеров и типов часто приходится применять специальные переходы: плавный, ступенчатый, переходы от прямоугольного волновода к круглому, от коаксиальной линии к прямоугольному волноводу и т.д. При этом возникает задача обеспечения структуры поля и типа волн, оптимальных для каждой из соединяемых линий передачи. Это достигается применением специальных фильтров и трансформаторов типов волн.

Плавный переход прямоугольного волновода представляет собой неоднородную линию с непрерывно изменяющимися погонными параметрами, предназначенную для согласования двух однородных линий с различными волновыми сопротивлениями. Длина переходной секции выбирается не меньше двух длин волн в волноводе. При этом волновое сопротивление перехода изменяется достаточно медленно, и отраженная волна практически не возникает.

Получили распространение плавные переходы от прямоугольного волновода к круглому. Длина переходного участка выбирается также не меньше двух длин волн в прямоугольном волноводе. Волна ос-

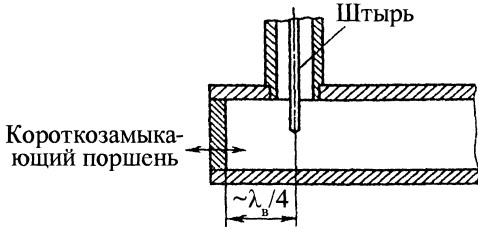


Рис. 1.13. Коаксиально-волноводный переход

новного типа прямоугольного волновода H_{10} переходит в волну основного типа в круглом волновод H_{11} , поскольку структуры их электрического и магнитного полей подобны.

На рис. 1.13 показан вариант перехода от коаксиальной линии к прямоугольному волноводу при возбуждении в нем волны основного типа H_{10} . Изменяя положение короткозамыкающего поршня и смещая стержень коаксиальной линии относительно оси, можно получить хорошее согласование, т.е. добиться максимальной передачи энергии в нагрузку. Обычно расстояние от поршня до стержня равно нечетному числу четвертей длины волн в волновод.

Ступенчатые переходы обычно применяют для соединения волноводов разных сечений одного и того же диапазона волн. Согласование их осуществляется с помощью четвертьволновых трансформаторов, клинообразных вставок и диафрагм.

Задача согласования направляющей системы с нагрузкой – установить в системе режим бегущей волны. Это достигается трансформацией сопротивления нагрузки или неоднородности в активное сопротивление, равное волновому сопротивлению используемой направляющей системы (линии передачи).

Практически согласованные линии осуществляют установкой между генератором и нагрузкой (неоднородностью), вызывающей отражение волны, искусственной *неоднородности* – согласующего

устройства. При этом стремятся, чтобы амплитуда отраженной от согласующего устройства волны была равна, а фаза противоположна отраженной в линии волне, т.е. отражения от согласующего устройства и нагрузки должны взаимно уничтожаться. Тогда между генератором и согласующим устройством устанавливается режим бегущей волны, а между нагрузкой и согласующим устройством – режим смешанных волн. Поэтому согласующее устройство желательно ставить как можно ближе к нагрузке.

Для согласования волноводов и коаксиальных линий применяют плавные переходы, диафрагмы, реактивные штыри, четвертьволновые трансформаторы и реактивные волноводные шлейфы.

Волноводные диафрагмы (рис. 1.14) – это тонкие поперечные перегородки, частично перекрывающие сечение волновода. Использование диафрагм для согласования волновода основывается на возможности компенсации волны, отраженной от нагрузки, волной, отраженной от диафрагмы. В настоящее время параметры диафрагм находят расчетным путем.

Неоднородность в волновод может быть представлена с помощью эквивалентной схемы (рис. 1.14). При этом коэффициент отражения для основной волны оказывается таким же, как коэффициент отражения в эквивалентной двухпроводной линии, в которую в соответствующем месте включена индуктивность или емкость.

Диафрагмы используют также в качестве элементов резонансных систем и фильтров.

Диафрагмы концентрируют преимущественно либо электрическое поле (рис. 1.14, а, б) и поэтому вносят в линию шунтирующую емкость, либо магнитное поле (рис. 1.14, в, г) и вносят в линию шунтирующую индуктивность. Диафрагма (рис. 1.14, д) эквивалентна параллельному соединению индуктивности и емкости и соответствует включению в линию парал-

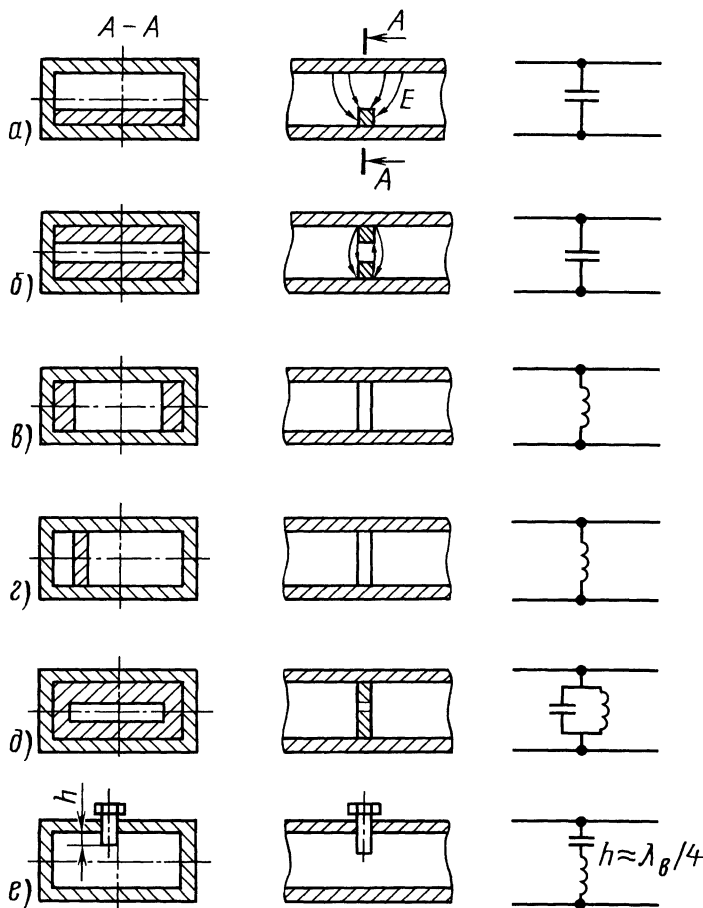


Рис. 1.14. Неоднородности в прямоугольном волноводе как элементы согласования

льного колебательного контура. При определенных соотношениях между размерами выреза и длиной волны этот контур настроен в резонанс с частотой генератора и не шунтирует волновод. Такую диафрагму называют резонансной. Чаще всего для целей согласования используют индуктивные диафрагмы. Емкостные диафрагмы на практике применяются реже, так как при их включении снижается допустимая мощность, которая может передаваться по волноводу. Резонансные диафрагмы применяют в некоторых типах антенных переключателей, а также для создания полосовых волноводных фильтров.

Наряду с диафрагмами в качестве сосредоточенной реактивности часто используют так называемый реактивный штырь, выполняемый в виде винта (рис. 1.14, e). Характер реактивности зависит от глубины h погружения штыря. Если $h < \lambda_g/4$, сопротивление емкостное. Введение длинного штыря в волновод ($h > \lambda_g/4$) эквивалентно включению некоторой индуктивности в линию. В случае резонансной длины ($h = \lambda_g/4$) имеет место эквивалентное включение в линию последовательного резонансного контура. Реактивные штыри также находят широкое применение для согласования волноводных линий передач.

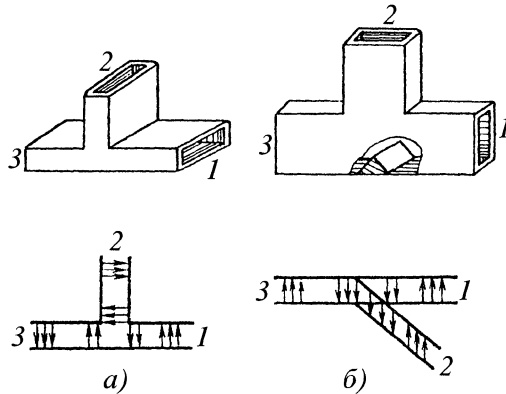


Рис. 1.15. Волноводные Т-образные ответвления E (a) и H -типа (b):
1, 3 – главный волновод; 2 – боковое ответвление

В конструкцию многих рассмотренных элементов волноводного тракта входят поглощающие нагрузки. *Маломощные поглощающие нагрузки* используют в таких устройствах, где требуется поглотить незначительную энергию (направленные ответвители, ослабители, маломощные циркуляторы). В качестве материала, обладающего большими поглощающими свойствами, часто применяют гетинаксовые пластины, покрытые с одной или с обеих сторон слоем графитовой или угольной суспензии.

В ряде устройств применяют объемные поглощающие нагрузки, способные рассеивать значительную энергию. Для лучшего отвода теплоты корпус таких нагрузок имеет ребристую конструкцию. Поглощающий материал по структуре подобен ферриту, однако обладает сильными поглощающими свойствами в диапазоне СВЧ. Это может быть металлокерамика, в состав которой входит порошковое железо или смесь песка с угольным порошком. Для уменьшения отражений торец поглощающей вставки делают скошенным, клинообразным или ступенькой, предназначенной для согласования вставки с волноводной линией. В последнем

случае частично заполненный участок длиной $\lambda_v/4$ имеет волновое сопротивление, равное среднему геометрическому волновых сопротивлений участков волновода, заполненного и не заполненного поглощающей нагрузкой. Этот участок выполняет роль согласующего трансформатора. Согласованный волновод обладает большими преимуществами перед несогласованным: устойчивостью режима при изменении частоты генератора, возможностью передачи большей мощности без опасности электрического пробоя и др.

На практике часто встречаются следующие ответвления волноводов: Т-образные соединения из прямоугольных волноводов, двойные волноводные тройники, кольцевые волноводные мосты.

На рис. 1.15 показаны два вида волноводных ответвлений для волны H_{10} в прямоугольном волноводе: *T-образное типа E* и *T-образное типа H* . Для волны основного типа E - и H -ответвления можно сравнить соответственно с последовательным и параллельным ответвлением длинной линии. Волна может возбуждаться в одном из плеч главного волновода и ответвляться в боковой волновод или, наоборот, возбуждаться в ответвлении и на-

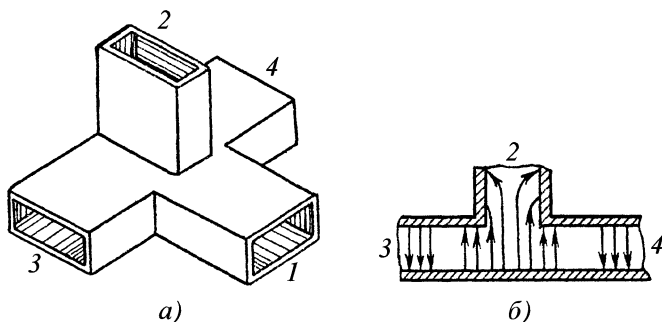


Рис. 1.16. Двойной волноводный тройник (а) и структура электрического поля в нем (б)

правляться в плечи главного волновода. Предположим, что волна H_{10} возбуждается в ответвленном волноводе и распространяется к Т-образному соединению. В обоих плечах главного волновода волны, равноудаленные от оси симметрии соединения, находятся в противофазе для E -тройника и в фазе для H -тройника. Такое распределение поля не изменится, если волна будет возбуждаться в одном из плеч главного волновода. Если в ответвляющееся плечо тройника поместить короткозамыкающий поршень, то это плечо приобретает свойства реактивного волноводного шлейфа.

Т-образные соединения прямоугольных волноводов для волны H_{10} обладают следующими свойствами:

- всегда можно выбрать такое положение плоскости короткого замыкания в одном плече, при котором связи между двумя другими плечами не будет;
- если тройник симметричен, то можно выбрать положение плоскости короткого замыкания таким образом, что волны между двумя другими плечами проходят без отражения;
- Т-образные соединения полностью согласовать невозможно.

Связь между волноводами может осуществляться не только с помощью всего поперечного сечения волновода, но и через щель, симметричную относительно боковых стенок. При этом необходимо

иметь в виду, что щель возбуждается только поперечными, пересекающими ее токами. Щели, расположенные параллельно этим токам, не возбуждаются и непригодны для связи двух волноводов. На свойствах Т-образных соединений основана работа *двойных волноводных тройников*.

Двойной тройник образован двумя ответвлениями от прямоугольного волновода (рис. 1.16). Поскольку двойной тройник выполняет роль волноводного моста, он получил весьма широкое распространение в волноводной технике (антенных переключателях, смесителях балансного типа, циркуляторах).

Чтобы проиллюстрировать свойства двойного тройника как волноводного моста, рассмотрим случай, когда энергия СВЧ поступает в плечо 1. Если боковые плечи 3 и 4 симметрично нагружены, то энергия из плеча 1 поровну делится между плечами 3 и 4 и не поступает в плечо 2, так как при симметрии полей в боковых плечах в плече 2 могут возбудиться только волны типа E , начиная с волны E_{11} . Однако при размерах волновода, определяемых волной H_{10} , волны типа E создают лишь местное поле в области разветвления и далее по волноводу 2 не распространяются (рис. 1.16, б). На основании свойства обратимости можно утверждать, что если из боковых плеч приходят две волны типа H_{10} с равными амплитудами и фазами, то они складыва-

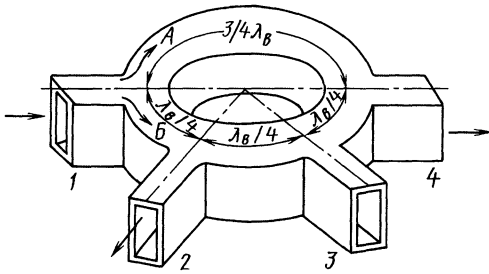


Рис. 1.17. Кольцевой волноводный мост

ются в плече 1 и взаимно компенсируются в плече 2. При питании из плеча 2 и симметрии нагрузок плеч 3 и 4 энергия делится между боковыми плечами и не поступает в плечо 1. Из изложенного следует, что плечи E и H двойного тройника взаимно развязаны, т.е. энергия волны H_{10} не может переходить из плеча E в плечо H и наоборот.

Двойной тройник обладает еще рядом полезных свойств, используемых в волноводной технике. Например, если в обоих плечах главного волновода распространяются волны с равными амплитудами и к Т-соединению они приходят в противофазе, то амплитуда волны в ответвленном волноводе равна удвоенной амплитуде волны в главном волноводе для E -тройника (плеча E) и нулю для H -тройника (плеча H). Если же волны приходят к Т-соединению в фазе, то в ответвленном волноводе амплитуда волны равна нулю для плеча E и удвоенному значению для плеча H .

На рис. 1.17 представлена схема кольцевого волноводного моста, изогнутого в плоскости узкой стенки волновода. Вдоль кольца укладывается $0,5(3 + 4k)$ длин волн в волноводе на средней частоте рабочего диапазона, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. К кольцу через промежутки $0,25(1 + 2k)\lambda_v$ подключено последовательно четыре волновода. Такое волноводное кольцо обладает свойствами волноводного моста.

Если генератор присоединен к плечу 1, а все остальные плечи нагружены на согласованные нагрузки, то волна раз-

ветвляется в сторону плеч 2 и 4 с противоположными фазами. От плеча 1 до плеча 4 обе волны (A и B) пройдут путь $3/4\lambda_v$. Так как их пути равны, волны придут к плечу 4 также с противоположными фазами, а поэтому волна придет в плечо 4.

Путь до плеча 3 для волны A на $\lambda_v/4$ больше, чем для волны B , поэтому волны к плечу 3 придут с одинаковыми фазами и волна в плечо 3 проходить не будет. В плечо 2 волна проходит. При включении источника в плечо 3 энергия поступит также только в плечи 2 и 4.

Существует несколько типов направленных ответвителей, широко используемых для отвода части энергии из основного волноводного тракта, измерения проходящей мощности, частоты и для других целей.

На рис. 1.18 показан направленный ответвитель с двумя отверстиями связи. Ответвитель состоит из двух волноводов, соединенных по узкой или широкой стенке. Отверстия связи расположены на расстоянии $\lambda_v/4$ друг от друга. Часть энергии волны, распространяющейся от генератора к нагрузке (антенне) в основном волноводе, через отверстия A и B , являющиеся ненаправленными возбудителями, проникает в волновод ответвителя и распространяется вправо и влево от отверстий. В сечении B ответвленные волны, распространяющиеся вправо, находятся в фазе, так как проходят одинаковое расстояние. Они складываются и направляются к выходу ответвителя. Волны, распространяющиеся влево, проходят различные пути: путь волны от отверстия B больше на полволны, чем от отверстия A . В результате эти волны складываются в противофазе и взаимно компенсируются.

Если в основном волноводе возникает отраженная волна $P_{отр}$, то, рассуждая аналогично, можно показать, что ответвляющаяся от нее часть энергии направляется только в сторону поглощающей нагрузки и не поступает на выход ответвителя. Таким образом, если по основному

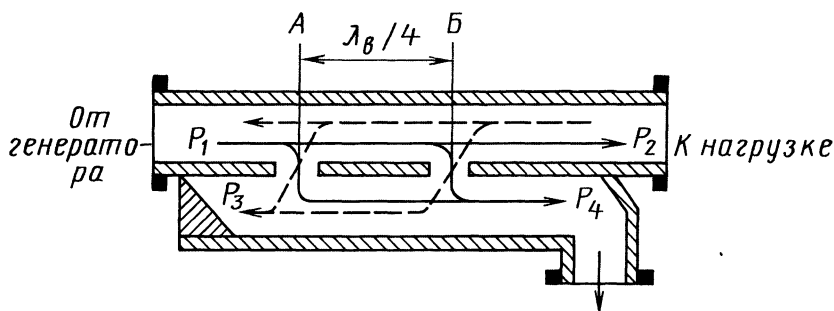


Рис. 1.18. Направленный ответвитель

волноводу распространяются падающая и отраженная волны, то на выходе ответвителя, соединенного с измерительным устройством, выделится только часть энергии падающей волны.

Направленный ответвитель характеризуется коэффициентом связи $C = 10 \lg(P_4/P_1)$ и направленностью $D = 10 \lg(P_4/P_3)$. При создании направленных ответвителей стремятся получить высокую направленность и небольшое отражение на входе в определенном частотном диапазоне.

На практике встречаются *направленные ответвители с одним отверстием связи*.

Интересен и важен для практики ответвитель – турникетное волноводное соединение (рис. 1.19). Если мощность от генератора СВЧ поступает в плечо 1, то она распределяется только в трех других плечах так, что

$$P_1 = P_3/2 + P_3/4 + P_4/4; \quad P_2 = 0.$$

При подключении генератора к плечу 3

$$P_3 = P_5/2 + P_1/4 + P_2/4; \quad P_4 = 0.$$

Если при этом плечи 3 и 4 закоротить соответственно на длине $5\lambda_g/8$ и $7\lambda_g/8$ и линейно поляризованную волну генератора СВЧ направить в плечо 1, то на выходе турникетного соединения (цилиндрическое плечо 5) будет излучаться волна с

правой круговой поляризацией. Если генератор подключить к плечу 2, то будет излучаться волна с левой круговой поляризацией. И наоборот, для приема волны с правой круговой поляризацией приемное устройство подключается в плечу 1, а с левой поляризацией – к плечу 2.

На этом принципе построен турникетный анализатор поляризации: при приеме и исследовании эллиптически поляризованной (отраженной) волны два согласованных детектора помещают в плечи 1 и 2, которые и зафиксируют две составляющие эллиптической волны: E_A и E_B .

Приемники радиоволн СВЧ. В приборах СВЧ для неразрушающего контроля и при всех экспериментальных работах в диапазоне СВЧ необходимо прежде всего установить наличие сигнала, измерить, усилить и обработать его. Известны многочисленные методы обнаружения сигналов СВЧ, однако практически наиболее распространены выпрямляющие устройства и термоэлектрические преобразователи.

Термоэлектрические преобразователи (термопары, терморезисторы, болометры и т.д.) широко используют для измерения тепловых величин. Их применение в технике СВЧ основано на тепловом действии энергии радиоволн СВЧ. Специфический вид термоэлектрического детектора – болометр, представляющий собой проводниковый или полупроводниковый резистор, который нагревается под воздей-

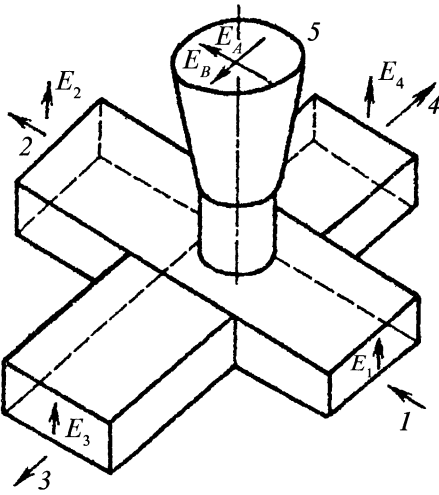


Рис. 1.19. Турникетное волноводное соединение

ствием излучения и вследствие этого изменяет свое сопротивление. Это изменение сопротивления может быть легко обнаружено с помощью соответствующих (например, мостовых) схем. Обычно через цепь, в которую включен болометр, пропускается постоянный ток – ток смещения. До тех пор, пока мощность сигнала меньше мощности, создаваемой током смещения, напряжение на выходе схемы прямо пропорционально мощности сигнала. Такие болометры очень удобны при измерениях, когда нужна высокая точность, однако они обладают сравнительно низкой чувствительностью

Термочувствительные полупроводниковые резисторы – *терморезисторы* предназначены для измерения мощности в диапазоне СВЧ. Они имеют вид маленькой бусинки из полупроводника диаметром около 0,4 мм, укрепленной между двумя тонкими проволочными выводами. Полупроводник образует сопротивление с очень большим отрицательным температурным коэффициентом. При использовании терморезисторов для измерений в устройствах СВЧ их сопротивление регулируется в широких пределах изменением

постоянного тока смещения, т.е. сопротивление терморезистора можно легко отрегулировать до значения, равного волновому сопротивлению типовой передающей линии диапазона СВЧ. Из-за малых размеров терморезистора его реактивное сопротивление мало по сравнению с активным сопротивлением на высокой частоте, что позволяет легко конструировать широкополосные терморезисторные головки. Высокая чувствительность к изменениям мощности нагрева делает терморезисторы пригодными для измерения мощности в диапазоне нескольких милливатт, однако это обстоятельство в свою очередь усложняет температурную компенсацию, особенно в случаях измерения очень малых мощностей.

Преобразовать сигналы СВЧ в постоянный ток или токи низкой частоты, которые могут быть измерены обычными методами, позволяют *полупроводниковые диоды*. Они могут быть использованы как детекторы или как преобразователи. Современные кристаллические детекторы являются наиболее чувствительными и доступными детектирующими устройствами, поэтому они широко применяются в измерительной аппаратуре. *Детектор* – это точечный диод, состоящий из тонкой вольфрамовой проволоки, образующей упругий контакт с полупроводниковым кристаллом. Если детектор используется в качестве преобразователя частоты, то на него совместно с сигналом СВЧ подается напряжение гетеродина и на выходе выделяется ток биений разностной частоты, амплитуда которого пропорциональна напряжению сигнала, если напряжение гетеродина во много раз превышает напряжение сигнала.

Когда кристаллический детектор используется в качестве детектора слабых сигналов, его выводы соединяются с прибором постоянного тока или входом усилителя (в зависимости от вида применяемой модуляции).

Важнейшие параметры кристаллического детектора вольт-амперная характеристика и чувствительность. Если напряжение сигнала достаточно мало и не выходит за пределы начального (квадратичного) участка вольт-амперной характеристики, то выпрямленный ток пропорционален квадрату приложенного напряжения. Поэтому детектор слабых сигналов называют квадратичным детектором.

Различают чувствительность детектора по току и по напряжению. Чувствительность по току/напряжению определяется как отношение выпрямленного тока/напряжения к поглощенной мощности высокой частоты. Типичная чувствительность по току составляет 0,1 ... 1,0 мкА/мкВт, по напряжению – 10 ... 300 мкВ/мкВт.

Детекторные диоды помещают в специальные конструкции – детекторные секции (головки). На рис. 1.20 приведена

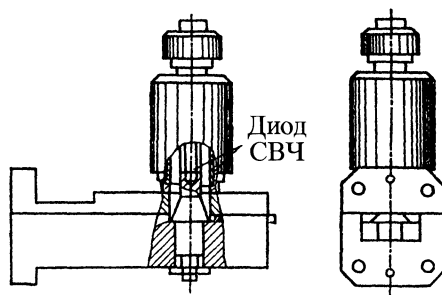


Рис. 1.20. Конструкция детекторной секции

распространенная конструкция детекторной секции восьмимиллиметрового диапазона. КСВН такой секции со стороны входа не превышает 1,2 в относительной полосе частот $\pm 10\%$.

Характеристики некоторых СВЧ-диодов приведены в табл. 1.5.

1.5. Характеристики СВЧ-диодов

Тип диода	Основное назначение	Рабочая длина волны, см	Наибольшие потери преобразования, дБ
Д403А-Д403В	Смеситель	3 ... 30	9
Д405-Д405БП*	То же	3	6 ... 8
Д602-Д602Б	Видеодетектор	27 ... 60	–
ДГ-С	Смеситель	3 ... 10	6,5 ... 8,5
Д604	То же	3	–
ДК-И	Измеритель	3 ... 10	–
ДК-В	Видеодетектор	3 ... 10	–
ДК-В8	То же	1,8 ... 3,2	–
Д606	«	0,8 ... 0,6	–
Д601А-Д601В	«	2 ... 1	–

*Полупроводник – кремний, в остальных диодах – германий.

1.4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОВОЛН С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

С точки зрения теоретической электродинамики задача контроля сред методами СВЧ может быть сформулирована в виде граничной задачи о взаимодействии конкретных типов электромагнитных волн определенного вида поляризации с ограниченными или полуограниченными в пространстве объемами этих сред, имеющими разнообразные геометрические формы, свойства поверхности и диэлектрические свойства, изменяющиеся при изменении структуры сред. Результаты взаимодействия зависят от геометрии объектов контроля, от значений их диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, которые, в свою очередь, определяются химико-минералогическим составом, кристаллической структурой, степенью однородности, влагосодержанием материала объекта контроля.

Электромагнитная волна, падая на плоскую границу раздела сред, частично проходит через нее, продолжая распространяться в измененном направлении – преломляется, частично же отражается от границы, которая при этом служит источником обратной волны, поэтому в первой среде имеются падающая и отраженная волны, а во второй преломленная. Падение электромагнитной волны на тело ограниченных размеров представляет собой принципиально аналогичное, однако значительно более сложное явление, называемое дифракцией. Ни отраженная, ни преломленная волны здесь уже не могут быть плоскими.

В однородной среде радиоволны распространяются прямолинейно с постоянной скоростью. Скорость распространения

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

В оптике коэффициент преломления n определяется как отношение C к скорости света в среде:

$$n = \frac{C}{V} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon\mu},$$

где ϵ – относительная диэлектрическая постоянная, а μ – относительная магнитная проницаемость. Тогда будем иметь

$$n^2 = \epsilon\mu.$$

Так как большинство материалов, применяемых при работе с радиоволнами, имеет удельную магнитную проницаемость порядка единицы, то квадрат коэффициента преломления практически равен удельной диэлектрической постоянной.

Если имеется ряд плоскостей, нормальных к оси Z , разделяющих пространство на области, заполненные средами с различными диэлектрическими постоянными, то внутри каждой среды мы можем представить поля в виде суммы двух волн, двигающихся вдоль положительного и отрицательного направления оси Z .

Реальные источники создают сферические волны, но на сравнительно большом расстоянии от источника малую часть фронта сферической волны можно считать плоской. Кроме того, получение практически плоской волны в СВЧ-диапазоне возможно путем использования специальных излучающих апертур (антенн).

В общем случае взаимодействия плоской монохроматической линейно поляризованной электромагнитной волны при наклонном падении под углом θ_0 на плоский диэлектрический слой толщиной h , материал которого имеет диэлектрическую проницаемость ϵ , расположенный между двумя диэлектрическими средами с ϵ_1 и ϵ_3 , получаем следующую зависимость для коэффициента зеркального отражения от слоя:

$$\dot{r}_c = \frac{\dot{r}_{1,2} + \dot{r}_{2,3} \exp(-i\dot{a}_2 2h \cos \theta_1)}{1 + \dot{r}_{1,2} \dot{r}_{2,3} \exp(-i\dot{a}_2 2h \cos \theta_1)}. \quad (1.1)$$

Здесь $\dot{r}_{1,2}$ и $\dot{r}_{2,3}$ – коэффициенты зеркального отражения от границ раздела

сред 1-2 и 2-3; $\theta_1 = \arccos \sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon_2} \sin^2 \theta_0}$ – угол преломления; \dot{a}_2 – волновое число, являющееся в общем случае вектором.

Данное выражение является общим для любого вида поляризации падающей волны (вертикальной и горизонтальной), а также для частного случая – нормального падения волны на слой, различие – в выражениях для входящих в него членов. Если поляризация падающей волны является произвольной и ξ – угол поляризации, то производится векторное разложение ее

на две составляющие: горизонтальную и вертикальную, с последующим расчетом по уже известным формулам. Результирующий коэффициент отражения определяется как

$$r = \sqrt{r_B^2 \cos^2 \xi + r_r^2 \sin^2 \xi}.$$

Учитывая, что $r_c = |r_c| e^{-i\varphi_c}$ и $R_c = |r_c|^2$, из выражения (1.1) находят выражения для энергетического коэффициента отражения от слоя R_c и фазы φ_c :

$$R_c = |r_c|^2 = R_{1,2} \frac{1 + 2\sqrt{R_{2,3}/R_{1,2}} e^{-2B_2h} \cos(2a_2h - \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3}) + (R_{2,3}/R_{1,2}) \bar{e}^{4B_2h}}{1 + 2\sqrt{R_{2,3}R_{1,2}} e^{-2B_2h} \cos(2a_2h + \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3}) + R_{2,3}R_{1,2} \bar{e}^{4B_2h}}; \quad (1.2)$$

$$\varphi_c = \arctg \frac{\sqrt{R_{2,3}} e^{-2B_2h} \sin(2a_2h - \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3})}{\sqrt{R_{1,2}} + \sqrt{R_{2,3}} e^{-2B_2h} \cos(2a_2h - \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3})} - \arctg \frac{\sqrt{R_{1,2}R_{2,3}} e^{-2B_2h} \sin(2a_2h + \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3})}{1 + \sqrt{R_{1,2}R_{2,3}} e^{-2B_2h} \cos(2a_2h + \varphi_{1,2} + \varphi_{2,3})} + \varphi_{1,2}. \quad (1.3)$$

В формулах приведены следующие обозначения:

для горизонтально поляризованных волн (вектор \bar{E} перпендикулярен плоскости падения)

$$R_{1,2} = \frac{(\cos \theta_0 - n_2^1)^2 + (k_2^1)^2}{(\cos \theta_0 + n_2^1)^2 + (k_2^1)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{1,2} = \frac{2k_2^1 \cos \theta_0}{(n_2^1)^2 + (k_2^1)^2 - \cos^2 \theta_0};$$

$$R_{2,3} = \frac{(n_2^1 - n_3^1)^2 + (k_2^1 - k_3^1)^2}{(n_2^1 + n_3^1)^2 + (k_2^1 + k_3^1)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{2,3} = \frac{2(n_3^1 k_2^1 - n_2^1 k_3^1)}{(n_3^1)^2 - (n_2^1)^2 + (k_3^1)^2 - (k_2^1)^2};$$

для вертикально поляризованных волн (вектор \bar{E} лежит в плоскости падения)

$$R_{1,2} = \frac{[(n_2^2 - k_2^2) \cos \theta_0 - n_2^2]^2 + [(n_2^2 - k_2^2) \cos \theta_0 + n_2^2]^2 + (2n_2 k_2 \cos \theta_0 - k_2^2)^2}{[(n_2^2 - k_2^2) \cos \theta_0 + n_2^2]^2 + (2n_2 k_2 \cos \theta_0 + k_2^2)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{1,2} = \frac{2[(n_2^2 - k_2^2) k_2^2 - 2n_2 k_2 n_2^2] \cos \theta_0}{(n_2^2 + k_2^2) \cos^2 \theta_0 - [(n_2^2)^2 + (k_2^2)^2]};$$

$$R_{2,3} = \frac{A - 2B}{A + 2B};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_{2,3} = \frac{2D^1(C^2 - D^2) - 4C^1CD}{\left[(n_2^1)^2 + (k_2^1)^2 \right] (n_3^2 + k_3^2)^2 - \left[(n_3^1)^2 + (k_3^1)^2 \right] (n_2^2 + k_2^2)^2};$$

$$A = \left[(n_2^1)^2 + (k_2^1)^2 \right] (n_3^2 + k_3^2)^2 + \left[(n_3^1)^2 + (k_3^1)^2 \right] (n_2^2 + k_2^2)^2;$$

$$B = C^1(C^2 - D^2) + 2D^1DC;$$

$$C = n_2n_3 + k_2k_3; \quad D = n_2k_3 - k_2n_3;$$

$$C^1 = n_2^1n_3^1 + k_2^1k_3^1; \quad D^1 = n_2^1k_3^1 - k_2^1n_3^1.$$

Остальные обозначения следующие:

$$n_k^1 = \sqrt{\left(\varepsilon_k^1/2\right) \left[\sqrt{1 + \left(\left(\varepsilon_k/\varepsilon_k^1\right)\operatorname{tg}\delta_k\right)^2} + 1 \right]} -$$

показатель преломления k -й среды при наклонном падении;

$$n_k = \sqrt{\left(\varepsilon_k/2\right) \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta_k} + 1 \right)} - \text{то же,}$$

при нормальном падении;

$$k_k^1 = \sqrt{\left(\varepsilon_k^1/2\right) \left[\sqrt{1 + \left(\left(\varepsilon_k/\varepsilon_k^1\right)\operatorname{tg}\delta_k\right)^2} - 1 \right]} -$$

показатель затухания k -й среды при наклонном падении;

$$k_k = \sqrt{\left(\varepsilon_k/2\right) \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta_k} - 1 \right)} - \text{то же,}$$

при нормальном падении;

$\dot{\varepsilon}_k = \varepsilon_k(1 - i\operatorname{tg}\delta_k)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость k -й среды;

$\varepsilon_k^1 = \dot{\varepsilon}_k - \sin^2\theta_0$; θ_0 – угол падения плоской электромагнитной волны; h – толщина слоя; $a_2 = \frac{\omega}{c}n_2^1$; $b_2 = \frac{\omega}{c}k_2^1$.

Наличие периодических членов в выражениях для R_c и φ_c свидетельствует об осцилляции данных функций при изменении a_2h или при постоянстве a_2 толщины h . Анализ зависимостей (рис. 1.21), полученных с помощью выведенных формул, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Пространственный период функции определяется выражением

$$\lambda_0/2 \sqrt{\left(\varepsilon_2^1/2\right) \left[\sqrt{1 + \left(\left(\varepsilon_2/\varepsilon_2^1\right)\operatorname{tg}\delta_2\right)^2} + 1 \right]}$$

или, при $\operatorname{tg}\delta_2 \ll 1$, $\lambda_0/2 \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2\theta_0}$.

Амплитуда осцилляций убывает пропорционально

$$\begin{aligned} & \exp - 2 \frac{\omega}{c} \sqrt{\left(\varepsilon_2^1/2\right) \left[\sqrt{1 + \left(\left(\varepsilon_2/\varepsilon_2^1\right)\operatorname{tg}\delta_2\right)^2} - 1 \right]} h \approx \\ & \approx \exp - \frac{\omega}{c} \frac{\varepsilon_2}{\sqrt{\varepsilon_2^1}} \operatorname{tg}(\delta_2) h. \end{aligned}$$

При значительном увеличении толщины слоя осцилляции прекращаются и коэффициент отражения от слоя становится равным коэффициенту отражения от передней границы раздела двух сред.

2. Полуволновые слои без потерь, расположенные в однородной изотропной среде, являются неотражающими. При этом диапазон углов падения, при которых отсутствует отражение от слоя, возрастает с уменьшением кратности толщины слоя половине длины волны в диэлектрике. Этот диапазон также становится шире при использовании вертикальной поляризации падающих на слой волн.

3. Как и в оптике, в радиоволновом диапазоне при наклонном падении волны на слой также можно осуществить согласование граничащих сред, результатом которого является отсутствие (минимум) отраженной энергии. Условие согласования – соответствующий выбор параметров промежуточного слоя, а именно:

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_3}; \quad \text{tg} \delta_2 \ll 1;$$

$$h_2 = \frac{\lambda_0 (2m + 1)}{4\sqrt{\varepsilon_2 - \sin \theta_0}}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1.4)$$

Болеe качественное согласование возможно при вертикальной поляризации падающих на средy волн.

Указанные свойства зависимости коэффициента отражения от слоя используются в основе многих СВЧ-методов неразрушающего контроля материалов и сред, прозрачных в диапазоне СВЧ. Аналогичные рассуждения могут быть сделаны и для коэффициента прохождения волны T через радиопрозрачный слой, так как $T = 1 - R$.

При анализе результатов необходимо знать величину общего ослабления сигнала, вызванного взаимодействием со средой. Энергия волны будет уменьшаться из-за следующих основных причин: поглощения в среде; рассеяния макрочастицами; ослабления, вызванного неидеальной прозрачностью границ раздела; ослабления за счет неидеальной направленности приемопередающих антенн. В результате общее ослабление будет суммой этих составляющих:

$$N_1 = 8,65 \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2} h \text{tg} \delta_2;$$

$$N_2 = \frac{20h}{\sqrt[3]{V}} \lg \left(1 - \frac{8\pi\alpha^2 \omega^4 V^2}{3c^4} \right)^{-1};$$

$$N_3 = 10 \lg D_c^{-1};$$

$$N_4 = 10 \lg \frac{(4\pi)^3 h^4}{S_3 \lambda_0^2 G^2}.$$

Здесь V — объем частицы;
 $\alpha = \frac{3}{4\pi} \frac{\varepsilon_q - 1}{\varepsilon_q + 2}$ — коэффициент поляризуе-

мости частицы; ε_q — диэлектрическая проницаемость материала частиц; G — коэффициент направленного действия антенн; S_3 — эффективная отражающая площадь на

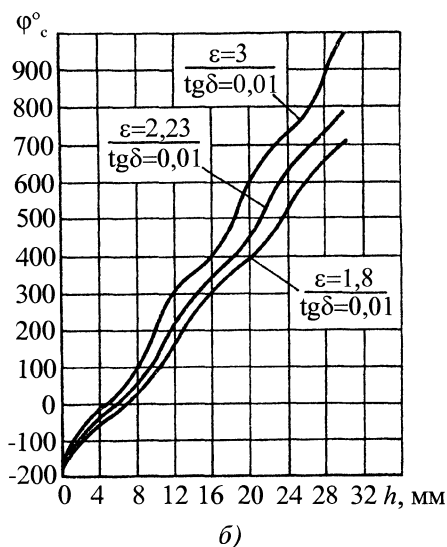
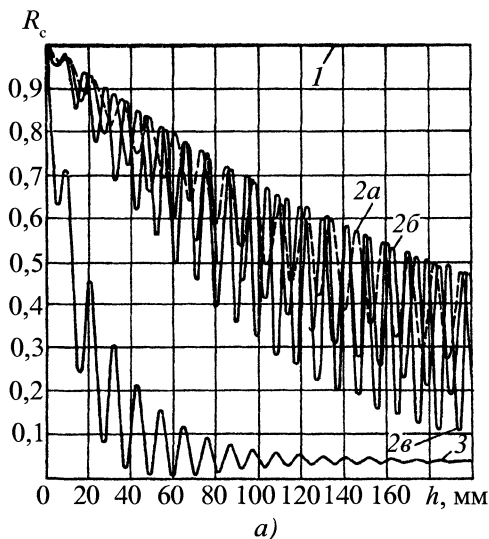


Рис. 1.21. Расчетные зависимости R_c (а) и φ_c (б) от толщины диэлектрического слоя на металлической основе:

- 1 — ε_2 — любое, $\text{tg} \delta_2 = 0$; 2, а — $\varepsilon_2 = 1,8$;
- 2, б — $\varepsilon_2 = 2,23$; 2, в — $\varepsilon_2 = 3,0$ и $\text{tg} \delta = 0,01$; 3 — $\varepsilon_2 = 2,23$ и $\text{tg} \delta_2 = 0,1$

противоположной поверхности слоя. Величина D_c например, для вертикальной поляризации падающих на слой волн, определяется выражением:

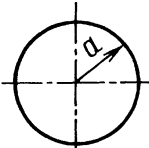
$$D_c = \frac{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_0 - \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n_2} \right) \right]}{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_0 + \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n_2} \right) \right]} \times \left\{ 1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_0 - \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n_2} \right) \right]}{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_0 + \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n_2} \right) \right]} \right\},$$

где $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ – показатель преломления материала слоя на рабочей длине волны. При наличии СВЧ генератора мощностью 10^{-2} Вт и приемника с чувствительностью 10^{-9} Вт, т.е. компактной аппаратуры с динамическим диапазоном в 70 дБ, возможно контролировать в режиме на отражение изделия больших габаритов, например максимальная глубина просвечивания широкого класса строительных материалов на длине волны 8 мм составляет 50 ... 100 мм, а в трехсантиметровом диапазоне 250 ... 600 мм.

1.5. РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН

При падении электромагнитной энергии на какой-либо проводящий объект на его поверхности возникают электрические токи, или электрические заряды, если объект диэлектрический. В этом случае объект сам становится источником излучения электромагнитных колебаний. Энергия падающей на объект электромагнитной волны рассеивается во всех направлениях.

1.6. Расчетные формулы для определения эффективной поверхности рассеяния геометрических тел

	<p style="text-align: center;">Шар</p> <p>При длине волны $\lambda \ll a$ $\sigma_{\text{ц}} = \pi a^2$.</p> <p>При длине волны $\lambda \gg a$ $\sigma_{\text{ц}} = \frac{144\pi^2 a^6}{\lambda^4}$</p>
---	---

Локальные неоднородности и дефекты в протяженной среде, как правило, будут являться источником рассеяния и дифракции. Рассеивающие свойства объекта (дефекта) характеризуют эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), определяемой выражением

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{S_s}{S_i} \right|,$$

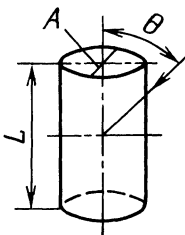
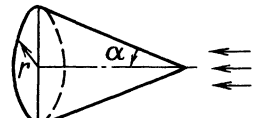
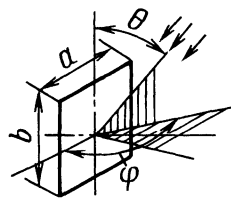
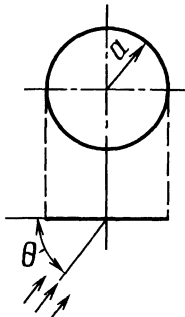
где S_s – плотность потока мощности рассеянного поля на расстоянии R от объекта, а S_i – плотность потока мощности падающей плоской волны. Отраженное поле от тела сложной формы или от системы дефектов, при условии пренебрежения эффектами переотражения от различных участков, может быть найдено в виде

$$\bar{E} = \sum_{n=1}^N E_n \exp[-i(\omega t - 2aR_n - \varphi_n)],$$

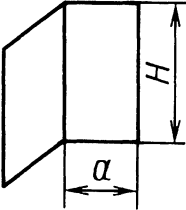
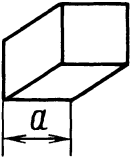
где E_n и φ_n – мгновенные значения амплитуды и фазы отраженного поля от n -го локального участка, R_n – расстояние до n -го участка, N – количество участков, $a = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная волны.

Расчетным путем можно определить ЭПР только для тел (дефектов) простой геометрической формы (табл. 1.6), тогда как для дефектов сложных форм рассеивающие свойства исследуют экспериментальным методом.

Продолжение табл. 1.6

	<p style="text-align: center;">Круглый цилиндр</p> $\sigma_{\text{ц}} = kAL^2 \sin^2 \theta \left[\frac{\sin(kL \cos \theta)}{kL \cos \theta} \right]^2;$ $\sigma_{\text{ц}} = kAL^2 \text{ при } \theta = \frac{\pi}{2};$ $k = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число}$
	<p style="text-align: center;">Конус</p> $\sigma_{\text{ц}} = \pi r^2 \operatorname{tg}^2 \alpha .$ <p style="text-align: center;">Направление облучения совпадает с осью конуса</p>
	<p style="text-align: center;">Прямоугольная пластина</p> $\sigma_{\text{ц}} = \left[\frac{kab}{\sqrt{\pi}} \sin \theta \frac{\sin(ka \sin \theta \cos \varphi)}{ka \sin \theta \cos \varphi} \right] \left[\frac{\sin(kb \cos \theta)}{kb \cos \theta} \right]^2$ <p style="text-align: center;">При нормальном падении к плоскости пластины</p> $\sigma_{\text{ц}} = 4\pi \frac{a^2 b^2}{\lambda^2}$
	<p style="text-align: center;">Плоский диск</p> $\sigma_{\text{ц}} = \pi k^2 a^4 \sin^2 \theta \left[\frac{J_1(2ka \cos \theta)}{ka \cos \theta} \right]^2$ <p>где J_1 – функция Бесселя 1-го порядка. При нормальном падении к плоскости диска</p> $\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2}$

Продолжение табл. 1.6

	<p>Двугранный уголкоый отражатель</p> $\sigma_{ц} = \frac{8\pi(aH)^2}{\lambda^2}$ <p>в максимуме диаграммы рассеяния</p>
	<p>Трехгранный уголкоый отражатель</p> $\sigma_{ц} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$ <p>в максимуме диаграммы рассеяния</p>
<p>Примечание. $\sigma_{ц}$ – эффективная поверхность рассеяния цели, дефекта.</p>	

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Классификация методов. По первичному информационному параметру различают следующие СВЧ-методы неразрушающего контроля: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый, частотно-фазовый, поляризационный, геометрический, временной. Первые пять методов основаны на регистрации одного или двух параметров волн, взаимодействующих с контролируемым объектом: амплитуды (интенсивности), модуля коэффициента отражения или прохождения, фазы, амплитуды и фазы, частоты (длины волны) и фазы, поляризации. Геометрический метод основан на регистрации пространственного положения максимума интенсивности радиоволнового пучка, прошедшего через объект или отраженного от его противоположной поверхности. Временной метод основан на регистрации времени прохождения волны (импульса) через объект. В зависимости от источника излучения ме-

тоды разделяются на активные и пассивные. При пассивных методах предполагается собственное излучение как самих контролируемых тел, так и сред, расположенных за объектом контроля, в СВЧ-диапазоне. В неразрушающем контроле последние методы пока редко используются. При активных методах используются, как правило, маломощные источники СВЧ-излучения с интенсивностью до 1 Вт. По расположению датчиков относительно объекта контроля различают три основных варианта: одностороннее расположение, двухстороннее и под прямым углом оптических осей друг к другу (способ фиксации параметров рассеянного излучения). Резонансные СВЧ-методы делятся по виду резонансного эффекта (электронный парамагнитный, ядерный магнитный, ферромагнитный, ядерный квадрупольный) и по характеру изменения магнитного поля (с постоянным или меняющимся магнитным полем).

Основные области применения методов и средств радиоволнового контроля даны в табл. 2.1.

2.1. Основные области применения СВЧ-методов

№ пп	Контролируемые параметры	Характеристики	Рабочий диапазон длин волн	Особенности
1	Геометрический параметр объекта: толщина, диаметр, нецилиндричность	Чувствительность ± 5 мкм Диапазон толщин 1 ... 500 мм Погрешность 3 ... 10 %	8 ... 30 мм	Возможность дистанционного контроля в сочетании с быстрым действием
2	Наличие и параметры дефектов	Пустоты, включения, изменения плотности, трещины Чувствительность – микротрещина $0,1 \times 10$ мм или расслоение $0,05 \times 10 \times 10$ мм	4 ... 30 мм	Бесконтактный контроль на отражение

Продолжение табл. 2.1

№ пп	Контролируемые параметры	Характеристики	Рабочий диапазон длин волн	Особенности
3	Структура, остаточные, тепловые и механические напряжения	Диэлектрики: керамика, ситаллы и т.п. Анизотропия через контроль изменений диэлектрических свойств с погрешностью 0,5 ... 3 %	2 ... 30 мм	Применение сканирования радиолуча
4	Влажность	Диапазон 0,5 ... 80 % Погрешность 0,5 ... 3 %	20 ... 30 мм	Автоматизированный контроль
5	Вибрации	Амплитуда 0,05 ... 10 мм Частота 0,1 Гц ... 100 МГц	8 ... 30 мм	Эллиптические и параболические антенны
6	Скорость движения, смещение объекта, поворот	Диапазон до 200 км/ч Чувствительность $2,5 \times 10^{-5}$ мм Чувствительность $\leq 1'$	8 ... 100 мм 2 ... 8 мм	Эффект Доплера Интерференционный и поляризационный методы
7	Диагностика плазмы	Контроль плотности, состояния плазмы	2 ... 100 мм	Спецантенны, зонды
8	Медицинская диагностика	Контроль состояния внутренних органов	СВЧ-диапазон	Переход к получению радиоизображения, к радиолографии, к СВЧ-томографии

2.2. СВЧ-ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

Методы СВЧ-толщинометрии используются для контроля толщины диэлектрических покрытий на любой металлической основе, на диэлектрической основе (при разнице диэлектрических свойств основы и покрытия), для толщинометрии диэлектрических слоев и металлических листов и проката. В практике неразрушающего контроля толщины наибольшее применение нашли методы: геометрический, амплитудно-фазовый, частотно-фазовый и поляризационный (эллипсометрический).

2.2.1. Геометрический метод

Если направить оптическую ось радиоволнового пучка, совпадающую с максимумом распределения интенсивности в поперечном сечении, под углом θ к нормали поверхности плоского диэлектрического слоя толщиной h , то расстояние между точками "входа" пучка и "выхода" равно

$$l' = 2 \int_0^h \frac{\sin \theta}{(n_2^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} dz,$$

где n_2 – показатель преломления вещества слоя в выбранном диапазоне рабочих длин

волн, а ось z совпадает с нормалью к поверхности слоя. Определяя наикратчайшее расстояние между отраженными от границ слоя пучками как $l = l' \cos \theta$, найдем, что

$$h = \frac{1}{\sin^2 \theta} (n_2^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}.$$

В геометрическом методе информация о толщине содержится в геометрическом параметре 1. Если, используя контактные призмы из того же материала, вводить пучок в слой без преломления, а угол θ выбрать равным $\arctg 0,5$, то получим $h = 1$.

Однако чем больше поперечные размеры применяемых пучков, чем больше их угловая расходимость, а также чем меньше при этом толщина диэлектрического слоя, тем сильнее проявляется взаимодействие отраженных пучков, приводящее к амплитудно-фазовым искажениям за счет интерференции в пространстве взаимодействия. Эти искажения приводят к значительной погрешности фиксации максимума отраженного от задней границы раздела пучка и, следовательно, к снижению точности определения толщины геометрическим методом. Для устранения этого явления используется согласование граничащих сред путем введения промежуточного слоя с параметрами, определенными выражениями (1.4). Согласующий слой увеличивает прозрачность передней границы раздела и, частично или полностью устраняя первый отраженный пучок, приводит к повышению точности измерений, чувствительности контроля толщины. При параллельной (вертикальной) поляризации согласование сохраняется практически в области углов падения от 0 до 50°, что очень важно при использовании расходящихся радиоволновых пучков.

Точность геометрического метода зависит от следующих трех основных источников погрешности: изменения диэлектрических свойств материала слоя,

ошибки измерения смещения максимума отраженного пучка и ошибки измерения угла падения первичного пучка.

Если инструментальную погрешность геометрического метода свести к нулю, то получим предельную относительную точность определения толщины, равную относительному изменению среднего значения показателя преломления измеряемой среды, т.е. $\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta n}{n}$.

Для снижения инструментальной ошибки должны быть выполнены следующие условия: сужение падающего радиоволнового пучка, обеспечение большей направленности приемной антенны при возможно меньшей площади раскрыва, а также уменьшение длины датчиков и зазора между ними и контролируемым слоем.

Реально достижимая относительная точность определения толщины геометрическим методом для сравнительно однородных диэлектрических сред лежит в пределах 3 ... 5 %.

Критерием оценки пригодности антенн для геометрического метода стали параметры: начальные размеры пучка, определяемые геометрическими размерами раскрыва; угол расходимости пучка; площадь поперечного сечения пучка на определенном расстоянии от раскрыва; форма распределения интенсивности в плоскости поперечного сечения.

Учитывая основные достоинства и недостатки различных типов антенн, а также их параметры в ближней и дальней зонах, для измерений тонких слоев на близких расстояниях рекомендованы открытые срезы волноводов, при больших толщинах и на больших расстояниях – рупорно-линзовые антенны, а для решения "промежуточных задач" целесообразно использовать излучатели в виде диэлектрических стрелковидных антенн. При этом незначительный уровень боковых и паразитной связи через открытое пространство при их близком расположении также указывает на перспективность использо-

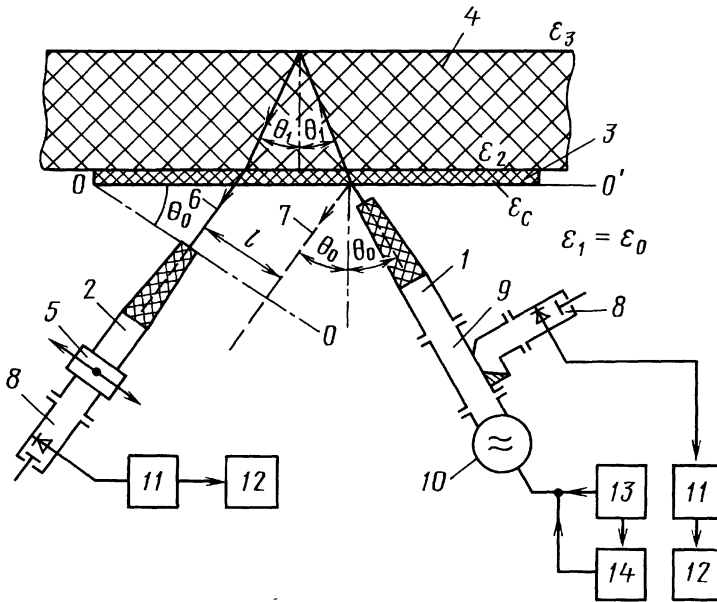


Рис. 2.1. Блок-схема геометрического метода измерений толщины:

1 – передающая антенна (излучатель); 2 – приемно-индикаторная антенна;
 3 – согласующая диэлектрическая пластина; 4 – контролируемый слой; 5 – механизм перемещения приемно-индикаторной антенны; 6 – оптическая ось пучка, отраженного от задней поверхности слоя; 7 – то же, но от передней поверхности без согласующей пластины;
 8 – детекторная секция; 9 – направленный ответвитель; 10 – генератор СВЧ; 11 – усилитель НЧ;
 12 – индикатор; 13 – источник питания; 14 – модулятор

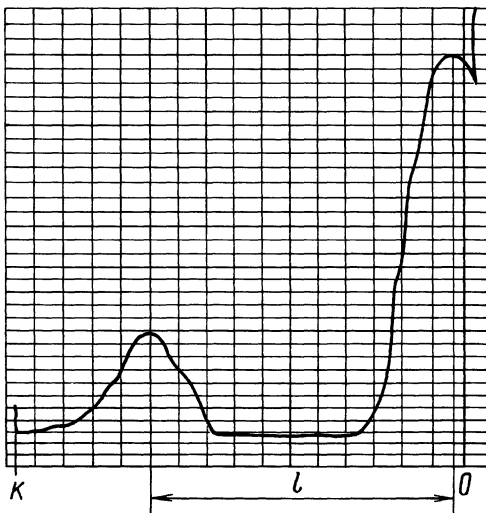


Рис. 2.2. Диаграмма записи отраженных от плоского слоя пучков (полистирол толщиной 141 мм):

$l_p = 93$ мм; $l_s = 96$ мм; $\delta_h = + 3,2$ %

вания антенн в виде диэлектрических стержней для реализации геометрического метода.

Экспериментальная проверка геометрического метода производилась в трехсантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн.

Блок-схема реализации геометрического метода измерения толщины приведена на рис. 2.1, а на рис. 2.2 приведена диаграмма записи отраженных от плоского слоя пучков.

Геометрический метод является абсолютным методом, позволяя контролировать толщину плоских слоев практически от нуля до значений, ограничиваемых заложенным в аппаратуре динамическим энергетическим диапазоном. Метод реализован в приборах, предназначенных для контроля толщины огнеупорных футеровок действующих стекловаренных печей.

Практически полученная точность определения толщины $\pm 10 \dots 15\%$ объясняется существенными изменениями в структуре огнеупоров, что приводит, соответственно, к непостоянству показателя преломления n_2 . Геометрический метод позволяет также измерить толщину слоя, не зная показателя преломления, если задать разные углы падения θ_1 и θ_2 . В результате имеем

$$h = l_1 l_2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{l_1^2 \sin^2 2\theta_2 - l_2^2 \sin^2 2\theta_1}}$$

2.2.2. Амплитудно-фазовый метод

В амплитудно-фазовом методе используется функциональная связь между коэффициентом отражения от диэлектрического слоя и его толщиной. Контроль изменения величины коэффициента отражения, как правило, производится с помощью введения дополнительного опорного сигнала той же длины волны. Поэтому, применяя высокочувствительные мостовые СВЧ-схемы, осуществляют одновременный контроль модуля и фазы коэффициента отражения, несущих информацию об изменении толщины слоя.

В общем виде амплитудно-фазовый метод является относительным. Измерение толщины может достоверно с высокой чувствительностью производиться в пределах линейного участка осциллирующей кривой, а также при условии априорного знания области измеряемых толщин. Предел однозначности измерений отвечает условию

$$h \text{ (или } \Delta h) \leq \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_2}}$$

Для устранения неоднозначности контроля применяют следующие способы:

- непрерывное измерение коэффициента отражения и счет числа максимумов (минимумов) результирующей интерференционной кривой;

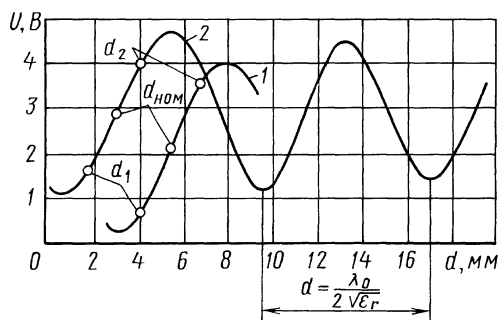


Рис. 2.3. Зависимость выходного сигнала от толщины ОК:

$d_{\text{НОМ}}$ – номинальная толщина ОК в диапазоне толщин $d_1 \dots d_2$; кривые 1 и 2 соответствуют различным зазорам между антенной и ОК

- использование двух рабочих длин волн, на одной из которых толщина определяется грубо, а на другой – более точно;
- применение фазовой модуляции полезного сигнала с целью определения крутизны линейного участка интерференционной кривой.

Точность измерений амплитудно-фазовым методом может быть весьма высокой, но не выше предела, обусловленного относительной величиной разброса диэлектрических свойств материала слоя, выраженной через отношение $\Delta n_2/n_2$. Относительная погрешность измерений толщины для достаточно однородных диэлектриков составляет $1 \dots 3\%$. Переходя к абсолютным величинам, это будет $50 \dots 100$ мкм на длине волны 3 см и $20 \dots 30$ мкм в восьмимиллиметровом диапазоне. Амплитудно-фазовый метод реализован в ряде СВЧ-толщиномеров: для контроля теплозащитных покрытий толщиной $2 \dots 16$ мм на металлических корпусах с погрешностью $\pm 0,1$ мм на частоте 9,3 ГГц; для контроля разнотолщинности теплозащитного покрытия на стеклопластиковых корпусах; для контроля толщины стеклянных полотен при производстве технического стекла.

На рис. 2.3 показана типичная зависимость выходного сигнала амплитудно-фазового СВЧ-толщиномера.

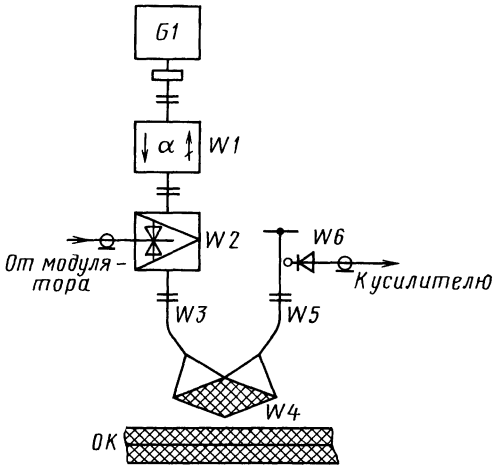


Рис. 2.4. Схема преобразователя прибора:

G1 – генератор; W1 – вентиль;

W2 – электрически управляемый аттенюатор;

W3 и W5 – соответственно передающая и приемная антенна; W4 – диэлектрическая призма;

W6 – детекторная секция

Приборы выполнены на 3 см ГЛПД. Принцип действия приборов основан на сравнении в мостовой схеме (на двойном волноводном тройнике) двух сигналов: опорного, создаваемого образцовым плечом моста, и измеряемого, пропорционального коэффициенту отражения от контролируемого диэлектрического слоя.

Приборы показали также хорошие результаты при контроле толщины антикоррозионных покрытий в заводских условиях нефтегазовых стальных труб большого диаметра.

Другой тип амплитудно-фазового СВЧ-толщиномера выполнен на восьми-миллиметровом генераторе Ганна и предназначен для измерения толщины тонких диэлектрических покрытий на диэлектрической основе. На рис. 2.4 приведена оригинальная часть прибора. Излучающая и приемная антенны опираются на грани диэлектрической призмы W4, обращенной вершиной к ОК. Призма служит концентратором энергии, в результате улучшается локальность контроля. Диапазон измеряемых толщин 0,15 ... 0,5 мм, основная

погрешность $\pm 0,02$ мм, минимальное расстояние зоны контроля от края объекта не более 10 мм, масса преобразователя 0,5 кг.

Разновидностью амплитудно-фазового метода является СВЧ-импедансный метод контроля толщины и удельного сопротивления полупроводниковых, эпитаксиальных и диффузионных слоев, например, полупроводниковых пластин толщиной 300 ... 2000 мкм и диаметром 30 ... 40 мм, германиевых пластин с эпитаксиальными слоями 0 ... 300 мкм, кремниевых пластин с диффузионными слоями 25 ... 50 мкм и др. Удельное сопротивление находится в пределах 10^{-4} ... 10^{-2} Ом · м. Входной импеданс структур, как правило, измеряется через фазу и минимум амплитуды стоячей волны с помощью измерительной линии. Контроль параметров полупроводниковых структур производится однопараметровым и двухпараметровым способами, при этом погрешность контроля толщины на длине волны 7,5 мм не превышает ± 15 %.

При реализации амплитудно-фазового метода наибольшее распространение получили схемы с двойным Т-образным волноводным тройником. Основной принцип получения информации заключается в следующем. В одно из Н-плеч тройника поступает энергия СВЧ, которая делится пополам между измерительным и опорным плечами. В измерительное плечо подключается приемно-передающая антенна, а в опорное – переменный аттенюатор и короткозамыкающий поршень для регулировки амплитуды и фазы опорной волны. Волны, отраженные от конца опорного плеча и объекта контроля, взаимодействуют в плече E, в результате чего происходит их сравнение по амплитуде и фазе. При номинальной измеряемой толщине h проводят балансировку прибора таким образом, чтобы в плече E сигнал отсутствовал. Отклонение толщины от номинала приводит к разбалансу схемы и появлению сигнала, пропорционального изменению толщины.

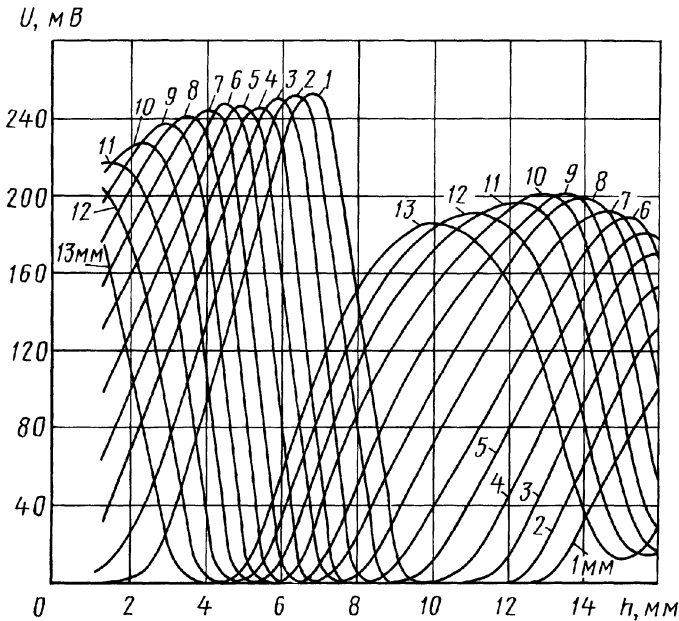


Рис. 2.5. Зависимость коэффициента отражения от толщины диэлектрического слоя, находящегося на металле, для различных расстояний между излучающей антенной и металлом

На точность измерения толщины влияют следующие факторы: состояние поверхности, однородность свойств материала по объему, стабильность работы аппаратуры, изменение положения зазора и угла датчика относительного образца, уровень развязки плеч двойного тройника и условия согласования с передней поверхностью.

Абсолютные значения толщины в большом диапазоне ее изменений можно получить при таком смещении интерференционной кривой, чтобы в районе измеряемых толщин находился линейный участок. Этого можно достичь с помощью перестройки частоты генератора, изменения расстояния (зазора) между антенной и поверхностью образца, изменения "электрической" длины опорного плеча фазовращателем.

На рис. 2.5 приведены интерференционные кривые, снятые для материала, находящегося на металлической подложке. Из анализа этих кривых следует, что

подбирая определенную величину зазора, можно перекрыть весь диапазон изменения толщин от 2 до 16 мм. Для обеспечения высокой точности антенна должна иметь большой коэффициент направленности, малые боковые лепестки, лучшее согласование.

Наилучшие результаты получают с помощью рупорных антенн или круглых волноводов малого диаметра с диэлектрической вставкой. При развязке плеч E и H порядка 60 дБ на фиксированной длине волны схема оказывается чувствительной к относительному изменению коэффициента отражения как по амплитуде, так и по фазе. Это позволяет получить точность измерения порядка 5 ... 50 мкм в зависимости от рабочей длины волны. Для измерений толщины диэлектрика на подложке диэлектрическая проницаемость подложки (для обеспечения точностных характеристик прибора) должна быть не менее чем в 1,5 раза больше или меньше диэлектрической проницаемости материала покрытия.

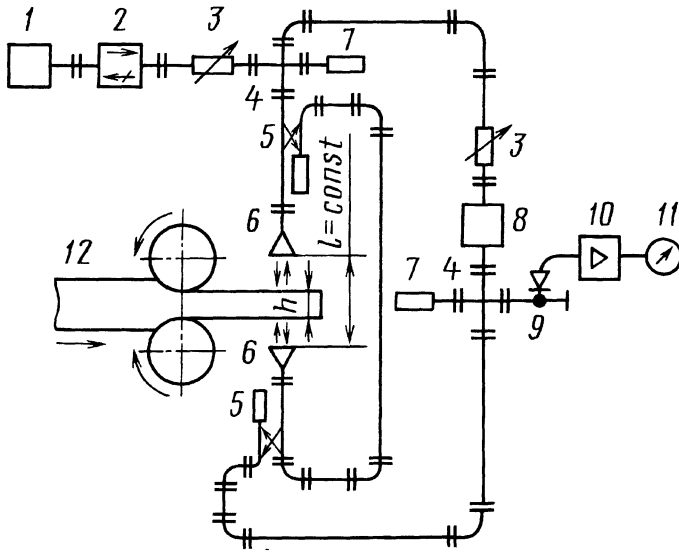


Рис. 2.6. Схема контроля толщины металлического листа:

1 – генератор; 2 – вентиль; 3 – аттенуатор; 4 – двойной тройник; 5 – направленный ответвитель; 6 – приемно-передающая антенна; 7 – нагрузка; 8 – фазовращатель; 9 – детекторная секция; 10 – усилитель; 11 – индикатор; 12 – прокатываемый металлический лист

Толщина диэлектрической подложки не должна меняться более чем на половину погрешности измерений. Допустимый минимальный диаметр контролируемых приборами цилиндрических изделий с учетом градуировки индикатора на криволинейных контрольных образцах составляет примерно 50 мм.

Амплитудно-фазовый метод пригоден для активного контроля толщины диэлектрических изделий и покрытий. Известны различные оригинальные конструкции СВЧ-датчиков, совмещенных с режущим инструментом, например типа "волновод-фреза", в котором измерительное плечо интерферометра заканчивается торцевой фрезой с отверстием.

Амплитудно-фазовый метод широко применяют для бесконтактного автоматизированного контроля толщины металлических лент, полос, проката при двухстороннем расположении антенн датчика относительно объекта контроля (рис. 2.6). Волна от СВЧ-генератора проходит одинаковый путь при номинальной толщине

листа до схемы сравнения с опорным сигналом той же длины волны. В таком устройстве проявляются все преимущества СВЧ-метода: одинаковая точность при измерении листов различной толщины; не влияет состав или изменения свойств металла; за счет бесконтактности процесса контроля могут подвергаться испытаниям листы, нагретые до высокой температуры; применение широких пучков устраняет влияние неровностей поверхности листа.

Применение рупорно-линзовых антенн позволяет получить высокие значения $K_{СВ}$ = 120 и обеспечить точность до 1 % в диапазоне длин волн 3,2 ... 10 см при поперечных перемещениях листа до $\lambda_0/6$. В некоторых странах (Англия, Япония, Франция, Украина) подобные установки работают в десятисантиметровом диапазоне радиоволн.

В последнее время микроволновый метод стали применять для контроля толщины тонких металлических покрытий на прохождении, используя значительную крутизну затухания СВЧ-радиоволн в тон-

ких металлических пленках. Практически амплитудно-фазовый метод становится чисто амплитудным. Известно, что для большинства металлов глубина проникновения микроволн (глубина скин-слоя) составляет в среднем 0,5 мкм (500 нм). Поэтому толщину сверхтонких металлических слоев и покрытий до 500 нм можно контролировать проходным микроволновым методом с высокими точностью и чувствительностью. Так, фирмой "Электрофизик" (ФРГ) разработан толщиномер "Электротест Т" с цифровой индикацией для измерения покрытий из серебра на зеркальных стеклах, покрытий из алюминия на конденсаторной фольге, видеопластинках и цифровых звуковых пластинках. Диапазон измерения толщин от 5 до 250 нм с погрешностью $\pm 3\%$. Рабочая длина волны прибора около 1 см. Для расширения диапазона измеряемых толщин необходимо увеличивать рабочую длину волны, но точность при этом будет снижаться.

Существуют и другие методы СВЧ измерений параметров тонких металлических и диэлектрических пленок на подложках, например метод, основанный на зависимости тока генератора СВЧ от изменения параметров ОК. Это так называемый автодинный эффект.

2.2.3. Частотно-фазовый метод

Данный метод, часто называемый методом переменной частоты, зародился в радиолокации и применяется в дальномерах и высотомерах, использующих частотную модуляцию несущего сигнала.

Метод реализуется при периодическом во времени изменении частоты СВЧ-генератора. Устройство (рис. 2.7, б) содержит электрически перестраиваемый по частоте СВЧ-генератор, узел разделения падающего и отраженного сигнала (симметричный направленный ответвитель), узел обработки отраженного сигнала совместно с опорным сигналом, приемно-передающую антенну и индикатор.

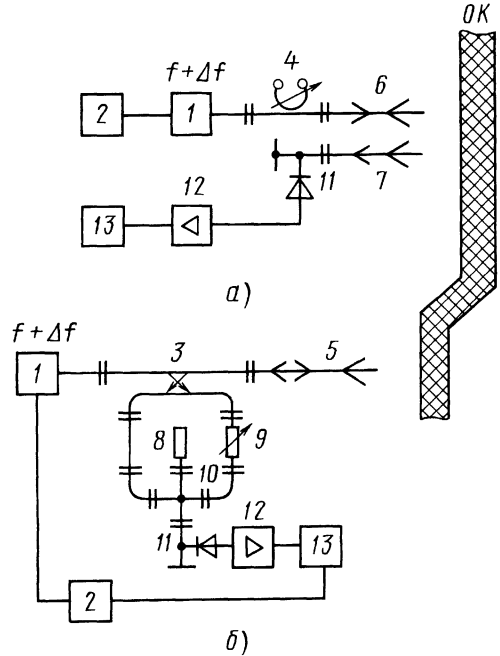


Рис. 2.7. Частотно-фазовый метод в двухантенном (а) и одноантенном (б) вариантах:

- 1 – перестраиваемый СВЧ-генератор; 2 – модулятор; 3 – симметричный направленный ответвитель; 4 – волномер; 5 – приемно-передающая антенна; 6 – передающая антенна; 7 – приемная антенна; 8 – нагрузка; 9 – аттенуатор; 10 – двойной тройник; 11 – детекторная секция; 12 – усилитель; 13 – индикатор

При перестройке частоты СВЧ-генератора зависимость результирующего сигнала будет осциллирующей и значение искомой толщины определяется как

$$h = \frac{NG \cdot c}{\sqrt{\varepsilon_2} (f_2 - f_1)},$$

где G – период осцилляции; N – число периодов (пиков); f_1, f_2 – крайние значения частоты перестройки; c – скорость света.

Метод переменной частоты может быть реализован и при двухантенной схеме (рис. 2.7, а). Если изменять частоту СВЧ-генератора и регистрировать разность частот, соответствующую ближайшим экстремальным значениям отражен-

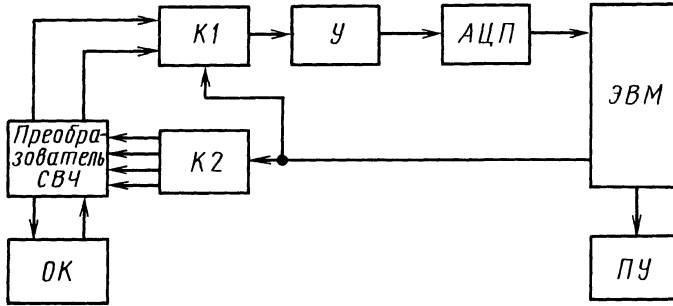


Рис. 2.8. Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод

ного от диэлектрического слоя сигнала, то можно определить толщину материала:

$$h = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_2} \cdot \Delta f'}$$

Чтобы исключить из выражения диэлектрическую проницаемость, необходимо провести измерение при новом значении толщины, дающем новую разность частот. При этом, совместно решая уравнения, будем иметь

$$h = \frac{|\pm \Delta h| \Delta f'}{\Delta f' - \Delta f}$$

Частотно-фазовый метод позволяет производить абсолютные измерения толщины диэлектрических сред способом на отражение в широком интервале изменений толщины с погрешностью 3 ... 6 %. Следует отметить, что ошибка измерения в значительной степени определяется точностью измерения частоты. Метод используют в толщиномерах строительных конструкций, ледового покрова и т.п.

В наиболее распространенных методах толщинометрии выходной сигнал, используемый для градуировки индикаторного прибора в значениях толщины, представляет функцию двух переменных: толщины и диэлектрической проницаемости материала ОК. В этой связи целесообразно более подробно рассмотреть *двухпараметровый многочастотный метод НК*. Многочастотный метод заключается в

измерении коэффициента отражения от поверхности ОК (в общем случае многослойного) на ряде фиксированных частот, число которых равно или превышает число параметров, подлежащих контролю. Подставляя в формулы для коэффициента отражения его измеренные значения, получим систему нелинейных уравнений, где неизвестны исследуемые параметры – толщина измеряемых слоев и диэлектрическая проницаемость материалов. Эту систему можно решать численными методами (Фурье-преобразование частотной зависимости коэффициента отражения, методом параметрической оптимизации, методом синтеза огибающей радиоимпульса и др.).

Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод, показана на рис. 2.8. Так как информация считывается на трех и более частотах, то для переключения частот генератора служит коммутатор *К2*. Для измерения модуля коэффициента отражения необходимы два канала (два электрических сигнала), поочередно подключаемые через усилитель *У* к *АЦП* через коммутатор *К1*. Для документирования процесса контроля служит печатающее устройство *ПУ*.

Прибор работает следующим образом. ЭВМ управляет коммутатором *К2*, который обеспечивает переключение частот. Отраженный от ОК сигнал и сигнал от генератора через СВЧ-преобразователь подаются на коммутатор *К1*, который по

команде ЭВМ поочередно подключает выход СВЧ-преобразователя через усилитель к АЦП. Сигналы в цифровой форме поступают в ЭВМ, где находится их отношение, дающее модуль коэффициента отражения. Затем цикл повторяется для всех используемых частот. После перестройки генератора на последнюю частоту и получения информации с АЦП ЭВМ

прекращает запрос данных и определяет толщину слоев. Затем ЭВМ выводит численные значения толщины на печатающее устройство и одновременно посылает управляющий сигнал на коммутатор $K2$. Цикл повторяется.

Один из приборов, реализующих данный метод, имеет следующие основные технические характеристики:

Число контролируемых слоев диэлектрических структур	1 ... 3
Минимальная толщина одного слоя, мм	30
Максимальная толщина структуры, мм	750
Диапазон значений контролируемых диэлектрических проницаемостей слоев, отн. ед.	2,0 ... 20,0
Минимально необходимое отношение диэлектрических проницаемостей соседних слоев	1,2
Локальность контроля, мм ²	100 × 100
Погрешность определения значений толщин слоев и расстояния до передней грани образца, мм	2
Уровень излучения СВЧ-мощности не превышает, Вт	5×10^{-3}
Время измерения, мин	5

2.2.4. Метод радиоволновой эллипсометрии

В основе метода лежит преобразование линейно поляризованной волны при отражении от ОК в волну, поляризованную по эллипсу, и измерение параметров последнего.

На практике в микроволновом диапазоне удобно измерять два основных эллипсометрических параметра, которые описывают форму и ориентацию эллипса поляризации: эллиптичность как отношение осей эллипса и азимут – угол большой оси эллипса к плоскости падения падающей и отраженной электромагнитных волн. Исследованиями установлено, что толщину тонких металлических пленок в диапазоне от 0,01 до 0,20 мкм на диэлек-

трических подложках можно контролировать путем измерения азимута отраженной СВЧ-волны, а толщину диэлектрических пленок в диапазоне от 1 до 100 мкм на металле – путем измерения величины эллиптичности.

Отличительной особенностью приведенных случаев является изменение только одного эллипсометрического параметра. Для системы металлическая пленка на диэлектрике – эллиптичность, а для системы диэлектрическая пленка на металле – азимут отраженной волны остаются постоянными с приемлемой для практики точностью. Выводы справедливы только для радиоволнового диапазона и физически вытекают из большой разности показателей преломления пленки и подложки в рассматриваемом диапазоне.

Если падающую волну выбрать линейно-поляризованной, то азимут отраженной волны при контроле металлических пленок можно измерить по величине отношения ортогональных составляющих, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярной ей. Это значительно упрощает процесс измерений и позволяет автоматизировать его. При измерении диэлектрических пленок появление эллиптичности в отраженной волне при линейно-поляризованной падающей свидетельствует о наличии пленки на металлической поверхности, а ее величина характеризует толщину, т.е. измерения необходимо производить от "нуля", и нижний предел контролируемых толщин определяется чувствительностью детектора СВЧ-излучения и характеристиками измерительных усилителей.

Метод реализован в приборе для контроля толщины пленок хрома на стеклянных подложках, идущих на изготовление фотосаблонов.

На показывающем приборе получаем отношение амплитуд ортогонально поляризованных составляющих сигнала $q = U_s/U_p$. При этом поляризационные характеристики отраженной волны определяются с погрешностью до $\pm 1\%$, показатель преломления и толщина слоя - с погрешностью до ± 3 и $\pm 8\%$ соответственно. Рабочий диапазон длин волн 2,5 ... 3 мм.

2.3. СВЧ-ДЕФЕКТОСКОПИЯ И СТРУКТУРОСКОПИЯ

2.3.1. Структурные неоднородности и дефекты

Изделия и конструкции из диэлектриков и полупроводниковых материалов могут иметь в себе дефекты следующих типов:

- нарушения сплошности (расслоения, отслоения, непрочности, раковины, воздушные включения, трещины и т.п.);

- инородные включения (металлические и диэлектрические с отличными от основного материала диэлектрическими свойствами), имеющие разнообразные формы и размеры;

- структурные неоднородности (изменения плотности и пористости, отсутствие или недостаток связующего, неравномерное распределение вещества – неомогенность состава или смеси, технологические или эксплуатационные проявления анизотропии и т.д.).

С другой стороны, все дефекты разделяют на локальные, соизмеримые и меньше длины волны, и протяженные, больше длины волны. Классическим примером локального дефекта является воздушный пузырь в диэлектрической стенке, протяженного – расслоение с размерами в несколько длин волн.

Неоднородности любого типа вызывают деформацию полей волн, прошедших через материал или отраженных от него. При этом меняются амплитуда, фаза, поляризация волн, коэффициенты отражения, преломления. Структурные элементы обнаруживают также, используя явление рассеяния, дифракции и интерференции. Если размеры неоднородностей невелики по сравнению с рабочей длиной волны, то основную роль при их обнаружении играют рассеяние и дифракция. В известной степени указанными явлениями можно управлять в целях более качественного анализа структуры: так называемые методы просветления структурных элементов. Чувствительность дефектоскопа определяется прежде всего рабочей длиной волны. Теоретически, чем короче длина волны, тем вероятнее надежное выявление более мелких структурных элементов. Однако практически выбор рабочей длины волны определяется не только этим, но и другими факторами: при укорочении волны возрастают поглощение (рассеяние) в среде и относительная допустимая неод-

нородность материала, выражаемая через отношение $\Delta n/n$. Поэтому оптимальную рабочую длину волны находят теоретически и экспериментально. Чувствительность также зависит от выбранного метода и схемы прибора, реализующего метод, от типа и размеров антенн и т.д. Анализ многочисленных работ показывает, что при равных условиях повышение надежности контроля связано с применением в дефектоскопии методов корреляционного анализа и синхронного накопления, а также методов многопараметрового контроля.

Для априорной оценки возможности выявления конкретных дефектов в средах с известными свойствами, как правило, производится математическое моделирование процесса взаимодействия СВЧ-излучения со средой. При этом радиодефектоскоп, контролируемое изделие, окружающая среда рассматриваются как единая система. Составляя математическую модель системы, необходимо учитывать свойства среды и материала изделия, их изменчивость и распределение в трех измерениях, характер и свойства дефекта.

Протяженный дефект (например, расслоение) рассматривается как появление в системе дополнительного промежуточного слоя с отличными от основной среды свойствами. В этом случае задача обнаружения дефекта решается путем нахождения модуля и фазы коэффициента отражения или прохождения для системы с $(n + 1)$ слоем. Ясно, что если электрофизические параметры дефекта мало отличаются от свойств среды и размер в направлении распространения волны также мал, то такой дефект практически будет чисто фазовым и определяющую роль в его обнаружении будет играть измерение изменения фазы.

Локальный дефект рассматривается, как правило, в качестве источника рассеяния и дифракции, рассеивающие свойства которого характеризуются эффективной поверхностью рассеяния.

Заклучение о наличии дефекта в объекте контроля выносится по пороговой величине изменения интенсивности принимаемого результирующего сигнала. При диэлектрической или иной анизотропии величина сигнала в приемной антенне зависит от угла между плоскостью поляризации излученной электромагнитной волны и образца. После прохождения анизотропного слоя волной, поляризованной по кругу, мы получаем в общем случае волну, поляризованную по эллипсу, которую представляем в виде суммы двух волн, поляризованных по кругу вправо и влево с разными амплитудами:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_0 \sqrt{2}}{4} (T_x^2 + T_y^2 + 2T_x T_y \cos \Delta)^{1/2};$$

$$E_{\text{лев}} = \frac{E_0 \sqrt{2}}{4} (T_x^2 + T_y^2 - 2T_x T_y \cos \Delta)^{1/2};$$

$$\Delta = \Phi_x - \Phi_y,$$

где E_0 – амплитуда излученной волны; T_x и T_y – коэффициенты прохождения слоя по амплитуде для волн, поляризованных в плоскостях xz и yz (z – направление распространения); Φ_x и Φ_y – фазовые набегги при прохождении слоя волнами E_x и E_y .

Если приемная антенна принимает волны, поляризованные по кругу влево, а также $T_x = T_y = T$, то интенсивность сигнала в приемной антенне

$$I = \frac{1}{4} k I_0 T^2 \sin^2 \frac{\Delta}{2},$$

где k – апертурный коэффициент.

На основе изложенных принципов строится математическая модель, производится априорный расчет возможности обнаружения дефектов и осуществляется выбор методов и средств дефектоскопии и структуроскопии.

Расчеты показывают, что отдельные локальные дефекты и структурные элементы могут быть обнаружены, если их линейные размеры порядка $0,1\lambda$ и более. Два близких элемента могут быть раздельно выявлены, если расстояние между ними порядка $0,5\lambda$ (λ – рабочая длина волны).

2.3.2. Дефектоскопы на прохождение

В этом случае внутреннее состояние объекта контроля определяется по воздействию среды на сигнал, прошедший через образец.

Принципиальная схема метода приведена на рис. 2.9. Основой метода является наличие двух антенн (приемной и излучающей), находящихся по разные стороны объекта контроля и, как правило, соосных между собой.

В основном существуют две принципиальные блок-схемы приборов, в которых применен метод "на прохождение" (рис. 2.10).

Принцип работы схемы, в которой все элементы обозначены сплошной линией, заключается в следующем. Энергия

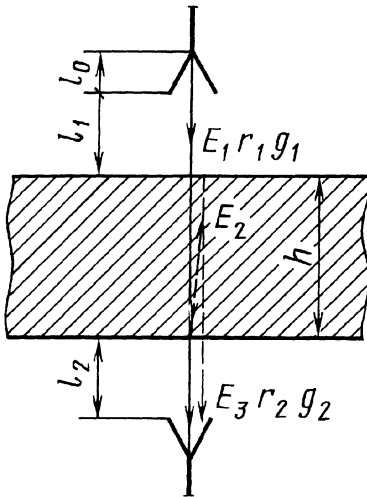


Рис. 2.9. Принципиальная схема образования сигнала в схеме "на прохождение" l_0 – длина рупора;

l_1 – расстояние от края излучающего рупора до первой поверхности; l_2 – расстояние от второй поверхности до приемного рупора; h – толщина контролируемого изделия; $r_{1,2}$ – коэффициент отражения от первой и второй границ; $g_{1,2}$ – коэффициент прозрачности первой и второй границ; E_1 – излученная волна; E_2 – волна в образце; E_3 – принимаемая волна

СВЧ от генератора 2 подается через вентиль 3, волновод и аттенуатор 4 к излучающему рупору 5. Энергия проходит через образец 10, принимается приемной антенной 6 и через измерительный аттенуатор 4 попадает на детектор 7, после чего сигнал усиливается и подается на индикаторный прибор 8. Такая схема позволяет проводить контроль свойств материала по величине затухания энергии СВЧ в образце, отсчитываемой по шкале аттенуатора, с помощью которой величина сигнала индикаторного устройства прибора поддерживается на постоянном уровне.

Для большинства практических случаев мощность принимаемого сигнала можно определить по формуле

$$P = \frac{P_0 S}{2\pi} g_1^2 g_2^2 \left[\frac{1}{(l+h)^2} + \frac{r_1^2 r_2^2}{(l+3h)^2} - \frac{2r_1 r_2}{(l+h)(l+3h)} \cos 2k_2 h \right],$$

где P_0 – излучаемая мощность; $l = l_1 + l_2 + l_0$; $k_2 = 2\pi/\lambda_e$ – волновое число в образце; r_1, r_2, g_1, g_2 – коэффициенты отражения и прохождения; S – эффективная площадь приемной антенны.

Схему, в которой часть элементов отмечена пунктиром, часто называют интерферометром с открытым плечом. В этой схеме прошедший сигнал сравнивается по амплитуде и фазе с опорным, подаваемым через аттенуатор 4 и фазовращатель 9. Такая схема обладает более высокой информативной емкостью, чем первая, но в ряде случаев, когда объект контроля имеет большие размеры, ее трудно осуществить. Чтобы исключить влияние переотражений, необходимо согласовать границы раздела с приемной и излучающей антеннами, т.е. исключить появление стоячей волны.

Таким образом, дефектоскоп обеспечивает работу фазовым и амплитудным методами. При контроле фазовым методом на дефектоскоп устанавливают и од-

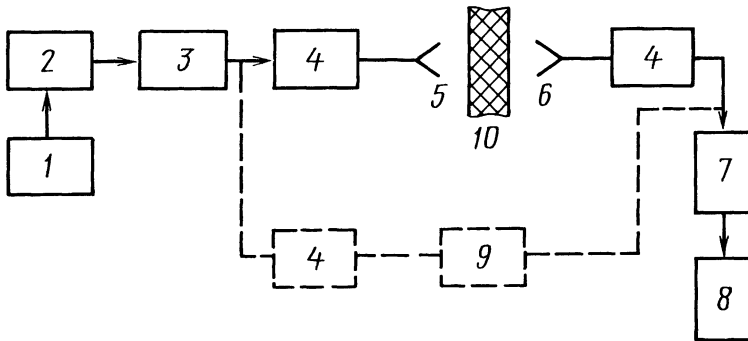


Рис. 2.10. Блок-схема амплитудно-фазовых приборов, работающих по схеме "на прохождение":

1 – блок питания; 2 – источник энергии СВЧ; 3 – развязывающий элемент (ферритовый вентиль); 4 – аттенюатор; 5 – излучающая антенна; 6 – приемная антенна; 7 – детектор; 8 – блок обработки информации; 9 – фазовращатель; 10 – объект контроля

новременно сканируют антеннами два изделия: контролируемое и эталонное (без дефектов). При работе амплитудным методом одно плечо фазового моста и стола с эталонным изделием отключают. Для слежения антенн за профилем контролируемого и эталонного изделий используют подпружиненные упоры, скользящие по поверхности.

Результаты контроля часто фиксируют с помощью светооптической системы, которая вместе с точечным источником света типа ТМН-2 перемещается. Яркость светового луча модулируют низкочастотным сигналом детектора приемной антенны, прошедшим через усилительный тракт.

Некоторые технические характеристики дефектоскопов

Минимальные размеры выявляемых дефектов:

расслоений, см ²	1 ... 2
трещин с раскрытием, мм	0,05 ... 0,1
недопрессовок объемом, см ³	1
иностраных включений диаметром, мм	1 ... 3
Рабочая частота излучения, ГГц	37,5
Мощность излучения, мВт	До 30
Шаг подачи антенн, мм/об	0,8 и 1,6

Кроме амплитудного, фазового и амплитудно-фазового методов в режиме на прохождение широко используют геометрический и поляризационный методы. В поляризационном методе поляризации антенн, расположенных соосно с обеих сторон объекта контроля, ортогональны. Поэтому в отсутствие дефекта сигнал ми-

нимален (теоретически равен нулю), а при появлении дефекта, деполаризующего линейно поляризованное излучение, сигнал возрастает.

2.3.3. Дефектоскопы на отражение

Для контроля объектов способом на отражение в настоящее время используют

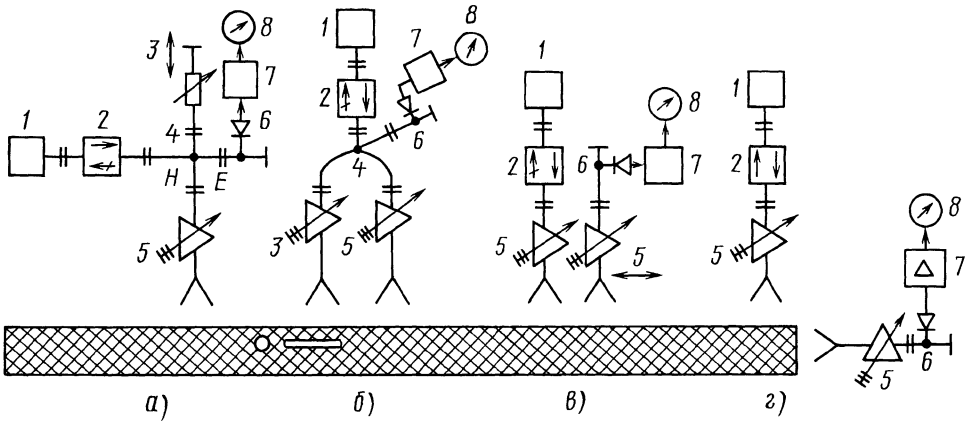


Рис. 2.11. Типичные схемы (а, б, в, з) амплитудно-фазовых дефектоскопов (режим работы на отражение):

1 – генератор; 2 – вентиль; 3 – опорное плечо; 4 – двойной тройник; 5 – антенна; 6 – детекторная секция; 7 – усилитель; 8 – индикатор

ряд методов: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовой, поляризационный, геометрический и поверхностных волн.

Схемы многих дефектоскопов построены на основе двойного волноводного тройника в качестве моста СВЧ (рис. 2.11, а). Если симметричные плечи тройника имеют одинаковую нагрузку, то отраженные волны СВЧ не проходят в выходное плечо тройника, мост согласован, а сигнал на выходе детекторной секции равен нулю.

Баланс моста, как правило, устанавливают изменением положений перестраиваемых элементов опорного плеча при постоянных значениях рабочего зазора и толщины объекта на эталонном изделии или бездефектном его участке. Обычно тройник выполняется с высоким уровнем развязки плеч E и H , составляющим величину $60 \dots 70$ дБ, что и определяет высокую чувствительность дефектоскопов, построенных по данному принципу, позволяя выявлять набег фазы до $0,02 \dots 0,002$ рад, изменение модуля коэффициента отражения до $2 \cdot 10^{-3}$, изменение $\Delta\epsilon/\epsilon$ от $0,19$ до $0,002$ и расслоения с раскрывом от $0,05$ до $0,005$ мм. Минимальные значе-

ния цифр относятся к случаю контроля диэлектрического листа, расположенного на металлическом "зеркале" при коэффициенте отражения около $1,0$, а верхние значения – при контроле без подложки, с коэффициентом отражения порядка $0,1$. Также возможно обнаружение локальных воздушных включений с размерами порядка $0,05 \dots 0,01\lambda_0$. Достоинством таких дефектоскопов является наглядность показаний и легкая их расшифровка, так как всем участкам контролируемого изделия, характеристики которых значительно отличаются от характеристик эталонного образца, соответствуют высокие значения выходного сигнала. Одноканальные (одноантенные) амплитудно-фазовые дефектоскопы могут обнаружить разные типы дефектов: от локальных до протяженных и равномерно распределенных, проявляющихся в изменении средних значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Основными мешающими факторами являются переменная толщина контролируемых изделий и изменение рабочего зазора. Если зазор можно стабилизировать, то изменение толщины при дефектоскопии выше описанным спосо-

бом является неустранимым мешающим фактором, приводящим к снижению надежности результатов контроля.

Влияние изменения толщины контролируемого слоя определяется осциллирующей функцией толщины слоя и диэлектрической проницаемости.

Для материалов с малым значением $\varepsilon'/\varepsilon_0$ можно с достаточной точностью считать, что при отношении сигнал/шум 2 : 1 выявляются только дефекты, вызывающие набег фазы:

$$\Delta\varphi \geq 8\pi \sqrt{\frac{\varepsilon' \Delta l}{\varepsilon_0 \lambda_0}},$$

где Δl – изменение толщины слоя.

Схема дефектоскопа на рис. 2.11, б лишена указанного недостатка. Она отличается от предыдущей тем, что в ней опорное плечо из управляемых аттенуаторов и короткозамыкателя заменено второй антенной. Симметричные плечи двойного волноводного тройника повернуты в одну сторону так, что антенны параллельны и направлены в сторону контролируемого объекта. Оба плеча тройника являются рабочими. Выявление неоднородностей производится путем сравнения коэффициента отражения от двух участков объекта, находящихся под антеннами. Если электрическая длина рабочих плеч одинакова, то схема является самобалансирующей и не реагирует на изменения зазора, толщины и диэлектрических свойств контролируемого слоя, если эти изменения происходят одновременно и одинаково под обеими антеннами. Любое изменение параметров слоя под одной из антенн по сравнению с параметрами слоя, находящегося под другой антенной, приводит к нарушению баланса моста и появлению сигнала на выходе детекторной секции. Недостатком такой схемы является то, что она фиксирует только границы протяженных неоднородностей, не дает информации об изменении свойств изделия в целом, а также результат зависит от перекоса датчика, приводящего к разнице

в величине между обеими антеннами. Однако основное достоинство схемы состоит в возможности контроля объектов с различными свойствами, толщиной и при переменном зазоре без перестройки режима.

На рис. 2.11, в приведен упрощенный вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа с двумя антеннами, расположенными рядом, одна из которых передающая, другая приемная. Опорным здесь служит сигнал связи между антеннами, который может регулироваться путем изменения их относительного положения. Вследствие воздействия большого фона, создаваемого отражением волн от бездефектного участка ОК, чувствительность схемы к дефектам меньше, чем в предыдущих вариантах. Этот фон можно уменьшить, поворачивая приемную антенну вокруг оптической оси на 90° , что соответствует случаю скрещенных поляризаций приемной и передающей антенн. В этом случае чувствительность схемы максимальна только к таким неоднородностям и дефектам, при отражении от которых происходит максимальный (до 90°) поворот плоскости поляризации первоначально линейно поляризованных волн – схема становится поляризационно чувствительной.

На рис. 2.11, г приведен вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа, являющегося амплитудным дефектоскопом при пространственном разнесении и расположении антенн таким образом, что приемная антенна реагирует только на рассеянную дефектом волну. Контроль оптимален при дефектоскопии объектов с размерами, соизмеримыми в трех измерениях: кубов, параллелепипедов и т.д.

Поляризационные дефектоскопы (рис. 2.12), фиксирующие изменение поляризации волн СВЧ, пригодны для обнаружения различных деполаризующих дефектов в изотропных материалах, но наиболее перспективно их применение для контроля диэлектрической и технологиче-

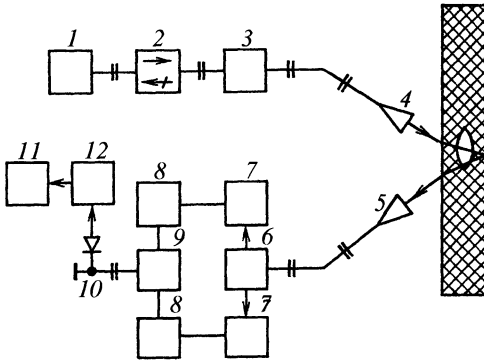


Рис. 2.12. Схема поляризованного дефектоскопа с использованием падающих волн круговой поляризации:

1 – СВЧ-генератор; 2 – развязывающий элемент; 3 – поляризатор; 4 – передающая антенна; 5 – приемная антенна; 6 – анализатор полярности (турникетное соединение волноводов); 7, 8 и 9 – соответственно элементы балансной схемы; 10 – детекторная секция; 11 – индикатор; 12 – усилитель

ской анизотропии, а также внутренних действующих или остаточных напряжений в диэлектрических изделиях. Чувствительность поляризационных дефектоскопов неодинакова к любым дефектам, так как не обеспечивается независимость результатов контроля от расположения дефекта, например, трещины по отношению к вектору падающей волны. Поэтому применение волны с переменной (круговой) поляризацией является более надежным и достоверным способом, позволяющим определить все рассеивающие свойства дефектов независимо от формы и расположения на фоне флюктуирующих помех. При появлении дефекта происходит изменение характера поляризации отраженной волны – возникает эллиптически поляризованный сигнал, баланс схемы нарушается, на выходе появляется сигнал разбаланса, соответствующий дефекту. К достоинствам схемы следует отнести малое влияние на форму дефектограммы изменения амплитуды и частоты генератора СВЧ. Надежность схемы повышается благодаря возможности вести запись трех независимых параметров.

Рассмотренные схемы дефектоскопов можно комбинировать. Например, если схему (см. рис. 2.11, б) запитать от рабочего плеча схемы (см. рис. 2.11, а), а рядом с парой приемно-передающих антенн дифференциального дефектоскопа расположить ортогонально и симметрично пару приемных антенн, подключенных к третьему тройнику, то получим схему трехканального дефектоскопа, реализующего сразу три метода: амплитудно-фазовый с опорным плечом, амплитудно-фазовый дифференциальный и поляризационный, что повышает надежность контроля.

На этом принципе основана работа трехканального СВЧ-дефектоскопа на отражение.

Выявляемые дефекты: расслоение с раскрытием 0,1 мм и площадью 1 см² на глубине до 20 мм; поры, раковины диаметром от 1 мм на глубине до 15 мм и диаметром от 3 мм на глубине 15 ... 40 мм; трещины с раскрытием 0,1 мм длиной 1 см на глубине до 10 мм. Длина волны излучения 8 мм.

Дефектоскопы на основе геометрического метода целесообразно использовать для обнаружения и локализации дефектов. На рис. 2.13 показана схема реализации указанного метода с применением согласующих пластин, устраняющих отражения от границ раздела объекта контроля. Сигнал от дефекта будет выделяться в "чистом" виде, давая наиболее точную информацию о его геометрии, пространственном положении и глубине залегания. Суть метода в том, что если оптические оси приемной и передающей антенн направить под одинаковым углом к поверхности объекта контроля и датчик сканировать по поверхности, то максимум сигнала при наличии дефекта будет при таком положении датчика и антенн, когда их оптические оси (после преломления лучей) сходятся на дефекте. Здесь обнаружение дефекта сочетается с определением глубины его залегания и формы путем сканирования. При

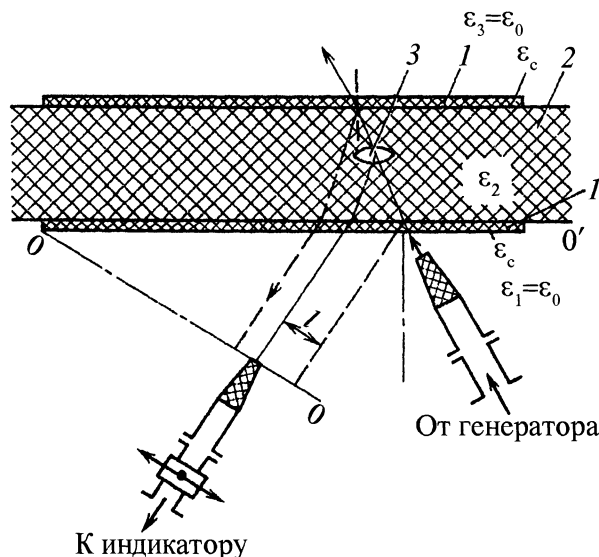


Рис. 2.13. Схема дефектоскопа, использующего геометрический метод:
1 – согласующая пластина; 2 – ОК; 3 – дефект

использовании в антеннах датчика контактных призм из того же материала, что и ОК, отпадает необходимость в согласующей пластине на передней границе раздела.

Метод поверхностных волн основан на приеме и анализе поверхностных замедленных волн, возбуждаемых в связанных неодинаковых диэлектрических волноводах, одним из которых является плоско-слоистый ОК, другим – расположенная параллельно ему активная диэлектрическая антенна.

Радиоволновой дефектоскоп поверхностных волн предназначен для контроля дефектов в слоистых диэлектрических изделиях и покрытиях на металлических и диэлектрических основаниях. Антенна (рис. 2.14) состоит из диэлектрического кольца, укрепленного на внешней цилиндрической поверхности металлического ролика, и двух диэлектрических волноводов, касающихся кольца по его диаметру. Вместе с секториальными рупорами диэлектрические волноводы образуют два согласованных волноводно-диэлектрических перехода. Один переход соединен с

генератором СВЧ и предназначен для возбуждения в диэлектрическом кольце поверхностной волны, другой служит для передачи энергии СВЧ, прошедшей через систему объект – диэлектрическое кольцо и электрически управляемый аттенюатор, на вход детекторной секции.

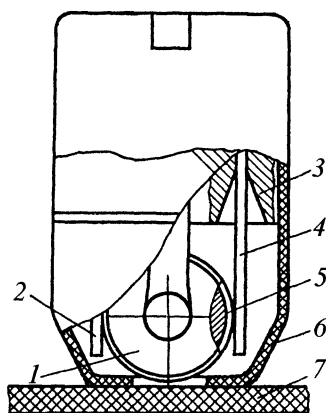


Рис. 2.14. СВЧ-преобразователь дефектоскопа поверхностных волн:
1 – металлический ролик; 2, 4 – диэлектрический волновод; 3 – секториальный рупор; 5 – диэлектрическое кольцо; 6 – ферроэлектрическое основание; 7 – ОК

Возбужденное диэлектрическое кольцо и расположенный в непосредственной близости от него плоскостойкий ОК образуют электрически связанную систему различных диэлектрических волноводов, в которой распространяются поверхностные волны. Фазовые скорости распространения волн и их амплитуды зависят от диэлектрических свойств ОК и антенны, их размеров и расстояния между ними. Изменение диэлектрических свойств ОК или появление в нем дефектов приводит к изменению амплитудно-фазовых характеристик связанных волн как в ОК, так и в антенне.

Метод обладает высокой чувствительностью к микрорасслоениям в ОК, ориентированным параллельно поверхности слоев, из-за появления скачка нормального компонента вектора электрического поля волны E -типа. Наибольшая эффективность взаимодействия и локальность контроля достигаются выбором параметров антенны резонатора и радиуса диэлектрического кольца.

Преобразователь СВЧ выполнен в малогабаритном ручном исполнении и содержит модуль генератора СВЧ, приемно-излучающую антенну, электрически управляемый аттенюатор и детекторную секцию, заключенные в корпус, основание которого изготовлено из ферроэпоксида. Основание одновременно служит защит-

ным элементом конструкции и эффективным поглотителем энергии СВЧ, экранирующим антенну от внешних и внутренних переотражений. В верхней части корпуса расположена сигнальная лампочка индикатора дефекта.

При ручном контроле преобразователь устанавливается на поверхность ОК без зазора и перемещается по всей поверхности в любом направлении. При механизированном контроле преобразователь располагается таким образом, чтобы внешняя цилиндрическая поверхность кольцевого волновода касалась объекта, а плоскость, в которой находится кольцо, была перпендикулярна его поверхности. При сканировании диэлектрический волновод вращается вместе с роликом, т.е. преобразователь как бы катится по поверхности объекта.

При установке датчика на стандартный образец в ОЗУ запоминаются данные о сигнале. Микропроцессор управляет автоматической калибровкой выходного сигнала преобразователя СВЧ и регулирует ток через аттенюатор так, чтобы сигнал с детектора соответствовал значению, заданному оператором и хранящемуся в ОЗУ. Автоматическая калибровка производится в течение всего времени, пока измеренный сигнал находится в 6 %-ной относительно калибровочного значения зоне.

Основные технические характеристики дефектоскопов поверхностных волн

Частота, ГГц	33,3 ± 0,15
Порог чувствительности (раскрытие расслоения при минимальной площади 0,8 см ²), мм	0,09
Предел допускаемой основной погрешности определения границ дефекта, мм, не более	4,5
Разрешающая способность (мм) на глубине до 4,5 мм, не более	9
Диапазон контролируемых толщин, мм	0,5 ... 8

2.3.4. Структуроскопы

По стандартному определению термин "радиоволновой структуроскоп" означает прибор радиоволнового неразрушающего контроля для качественного определения параметров объекта, характеризующих его структуру. С точки зрения материаловедения все материалы имеют вполне определенную структуру: кристаллическую, аморфную, полиаморфную, армированную, изотропную, анизотропную и т.п. Таким образом, качественные показатели материалов определяются не только отсутствием традиционных локальных дефектов, но и получением заданной структуры, часто для композиционных материалов называемой текстурой.

Например, широкое распространение керамических материалов определяется совокупностью их уникальных свойств: высокой огнеупорностью, механической прочностью, низкими электро- и теплопроводностью, высокой пластичностью исходного продукта. Они входят в конструкции доменных и стекловаренных печей, из них изготавливают изоляторы линий электропередач, посуду различного назначения, облицовочные плиты и др. Уже созданы автомобильные и авиационные двигатели с турбинами из огнеупорной керамики, ею покрываются корпуса ракет. Не менее важную роль играют резинотехнические и другие полимерные материалы. В состав таких материалов входят анизометрические частицы (макромолекулы в полимерах, игольчатые и пластинчатые частицы глин, каолинов, глинозема в керамиках).

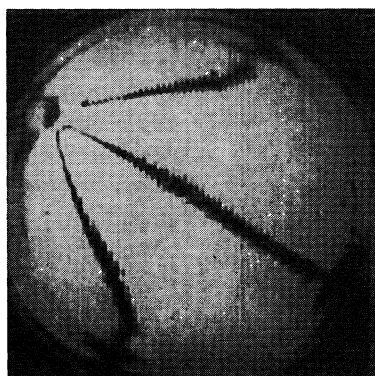
Одним из сложных керамических производств является изготовление крупногабаритных стержневых изоляторов. Оно разбивается на пять основных этапов: приготовление шихты, формование цилиндрических заготовок путем протяжки керамической смеси в шнековых вакуум-прессах, сушка заготовок, их обработка для придания нужных форм и обжиг. Ранее считалось, что качество изоляторов

зависит от состава шихты и выбора оптимального режима обжига. Применение радиополяризационного метода показало, что причины брака закладываются на стадии формования. Действительно, при этом под действием формирующих усилий анизометрические частицы массы приобретают определенную пространственную упорядоченность, т.е. образуют текстуру. Она обладает анизотропией диэлектрических, термических, прочностных и других физико-механических свойств. При сушке заготовок и обжиге изделий в результате анизотропии теплопроводности они неравномерно нагреваются и остывают. Это и является причиной появления внутренних напряжений, которые могут вызвать образование трещин или снизить прочность изделия. В изделиях из полимерных материалов формы текстур определяют их износостойчивость и прочность.

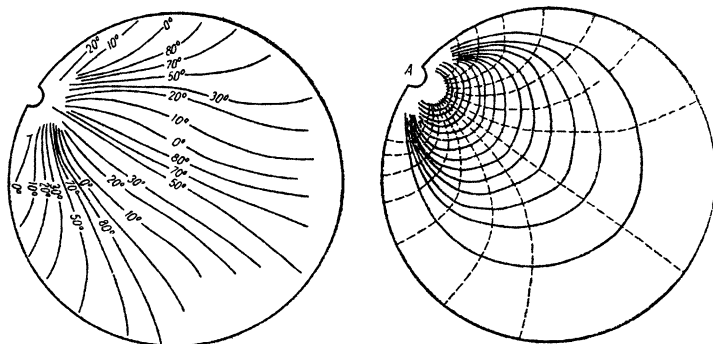
Однозначная связь между диэлектрической и другими видами анизотропии позволяет контролировать их с помощью электромагнитных волн, используя поляризованные волны и радиополяризационный метод.

Любое анизотропное состояние характеризуется в каждой точке положением главных осей напряжений и разностью показателей преломления, вызванных механическими и остаточными тепловыми напряжениями. В текстуре траекториям главных осей соответствуют направления преимущественной ориентации анизометрических частиц, а разность показателей преломления – степени их упорядоченности, в напряженном состоянии соответственно – траектории главных напряжений $\vec{\sigma}_x$ и $\vec{\sigma}_y$ и величины их разности $(\vec{\sigma}_x - \vec{\sigma}_y)$, которые во многом определяют последствия, вызванные внутренними напряжениями.

С помощью радиополяризационного метода можно получить фотографии изоклин-линий равного наклона главных осей и по ним построить траектории изостат-



а)



б)

Рис. 2.15. Радиоизображение изоклин (а) и построенные изостаты (б) на керамическом диске ($\lambda_0 = 8$ мм)

линий равного значения степени анизотропии. На рис. 2.15, а представлена фотография изоклин плоского керамического диска, а на рис. 2.15, б – соответствующие им изостаты. Участок А имел локальный дефект, послуживший причиной возникновения напряжений при обжиге диска (как будто в точке А приложена сосредоточенная нагрузка).

Управлять текстурой можно путем наладки и модернизации формирующих органов существующих прессов, а также выбором оптимальных конструкций, вновь создаваемых формирующих аппаратов. С помощью радиоструктуроскопа такой вы-

бор сделан среди трех конструкций прессов.

В радиоструктуроскопах (радиополярископах) используются антенны с линейно поляризованными волнами, причем вектор поляризации E излучающей антенны ортогонален вектору поляризации приемной антенны, т.е. в отсутствие анизотропии приема нет. Работа может быть "на прохождение" и "на отражение". Путем сканирования изделий или датчиков обследуется последовательно весь объект. Чем короче длина волны структуроскопа (при обеспечении радиопрозрачности всего изделия), тем качественнее радиоизображение структуры.

Под структурой также понимают наличие и определенное расположение в изделиях некоторых структурных элементов. Примером является исследование сложной внутренней структуры одной из лучших марок огнеупоров типа "бакор", получаемых способом литья. Следовательно, должны быть усадочные раковины. Их форма и расположение влияют на срок службы огнеупоров. На рис. 2.16 показано радиоизображение внутренней структуры бруса толщиной 250 мм на длине волны 3 см.

Сравнение радиоизображения и картины внутренней структуры бруса, полученной визуальным осмотром после его разрушения, показывает их качественное совпадение.

Таким образом, учитывая чувствительность радиоволн СВЧ к разного рода изменениям внутренней структуры, а также бесконтактность, быстроедействие, компактность измерительной аппаратуры, возможность одностороннего расположения ее по отношению к исследуемому объекту, можно сделать вывод, что применение радиоволн СВЧ-диапазона для контроля внутренней структуры огнеупоров является весьма перспективным.

Другим примером эффективного контроля структуры радиоволнами СВЧ является получение информации о макроструктуре резинотканевых строительных конструкций. Исследования проводили на образцах тентового материала типа "Волга", выпущенного на заводе резинотехнических изделий для купола основного сооружения международного молодежного лагеря. Силовая арматура – капроновая ткань, которая широко распространена в качестве резинотканевых конструкций. Покрытие с двух сторон из резиновой смеси Л-499 (композиция на основе хлорсульфированного полиэтилена с наиритом). Для варьирования характеристик макроструктуры использовали образцы других опытных материалов. При образовании клеевых соединений применяли



Рис. 2.16. Радиоизображение бруса, полученное методом на отражение (с помощью направленного ответвителя)

самовулканизирующиеся клеи на основе наирита и полиуретана.

Радиоволновые исследования проводили на специально созданной экспериментальной установке (рис. 2.17). Отличие созданной установки от аналогичных СВЧ-структуроскопов состояло в использовании стандартного приемника сигналов типа П5-15А (наименьшая измеряемая мощность 10^{-12} Вт).

Распределенные дефекты армирования являются закономерным следствием существующих технологических процессов нанесения резиновых покрытий. Поэтому при определении коэффициента однородности партии материала, идущей на изготовление конструкции, задача радиоволнового контроля состоит в выявлении и оценке распределенных дефектов. Локальные дефекты наряду с распределенными подлежат выявлению и оценке при определении нормативного сопротивления материала и дефектоскопии ответственных элементов конструкций.

Резинотканевые конструкции по сравнению с традиционными имеют существенные особенности: малую толщину (около 1 мм), высокую формуемость, низкую диэлектрическую контрастность структурных элементов и дефектов, малое расстояние между нитями армирующей

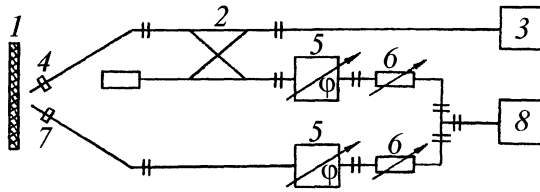


Рис. 2.17. Схема преобразователя СВЧ-структуроскопа:

- 1 – ОК-объект контроля; 2 – направленный ответвитель; 3 – СВЧ-генератор;
4 – приемно-излучающая антенна; 5 – фазовращатель; 6 – аттенюатор; 7 – приемная антенна;
8 – приемник радиоволн

ткани. Эти особенности определяют выбор метода и средств радиоволнового контроля, а также требования к конструкции установки. Рассмотрение существующих методов: амплитудного, амплитудно-фазового, поляризационного и поляризационного амплитудно-фазового позволило выявить наиболее универсальный – поляризационный амплитудно-фазовый.

Использование радиоволнового контроля при заводском изготовлении резиноканевых конструкций позволяет выявить параметры минимальных недопустимых дефектов армирующей ткани и клеевых соединений. При этом устройство контроля должно иметь следующие характеристики:

наименьшая мощность регистрируемого сигнала 10^{-10} Вт;

динамический диапазон не менее 60 дБ;

уровень помех в зоне контроля не более 55 дБ;

рабочая длина волны 8 мм.

Параметры дефектов арматуры определяются по ее визуальному изображению или по сопоставлению результатов контроля фактических направлений армирования в фиксированных точках.

Определение коэффициента однородности партии материала по результатам радиоволнового контроля состоит в последующей оценке прочности ориенти-

рованных в расчетных направлениях армирования участков материалов, равных стандартным образцам.

2.3.5. Радиоинтроскопы

Радиоинтроскопом называют любое радиоволновое устройство с визуализацией скрытого радиоизображения объекта контроля или многоэлементной обработкой информации на основе ЭВМ.

Одной из форм получения информации об объекте контроля является представление сигналов в виде яркостного светового изображения. Оно может быть получено на экране осциллографа, на фотохимической бумаге, фотобумаге, фотопленке, телевизионном экране, мониторе ЭВМ.

Существует несколько вариантов получения видимого изображения контролируемого изделия с помощью радиоволн.

1. Механическое сканирование одиночными антеннами (зондами). С помощью механических сканирующих систем обеспечивается последовательное перемещение одиночных зондов по законам разложения кадра, приведенным на рис. 2.18, а-б.

Используя системы синхронизации (перемещения светового луча, электронного луча, ножа фототелеграфного аппарата и т.п.) и подавая сигнал от детектора на модулирующее устройство, получают

изображение исследуемого объекта в соответствующем масштабе.

2. С помощью линейных антенных устройств. Антенные устройства выполнены в виде линейки одиночных приемных и излучающих элементарных антенн, образующих структуру кадра. На рис. 2.19 приведены принципиальная схема такой антенны и ее расположение относительно объекта контроля. Вторую координату можно получить путем перемещения антенных устройств относительно образца или наоборот. Принцип действия заключается в синхронном подключении строго ориентированных относительно друг друга излучающих и приемных каналов с помощью соответствующих коммутирующих устройств СВЧ.

3. С помощью матричных антенн. Антенны выполнены в виде матричного набора одиночных приемных элементов. Съем информации с такой системы может осуществляться различными способами: коммутирующими системами при одновременном преобразовании всего радиоизображения в видимое, с помощью специальных электронно-лучевых трубок или люминесцентных панелей. Отличительной особенностью этого способа является наличие коллимирующего устройства, обеспечивающего равномерное облучение объекта контроля для контролируемой площади. Быстродействие таких систем определяется инерционностью индикаторных устройств и может достигать 10^6 кадров в секунду.

4. С помощью непрерывно преобразующих систем. Этот способ отличается от предыдущего тем, что в качестве приемно-преобразующего элемента используют устройства, основанные на явлениях управления теми или иными физическими эффектами с помощью градиента температур, создаваемого при поглощении части радиоволновой энергии резистивным элементом. К таким устройствам относятся жидкокристаллические материалы, материалы, меняющие цвет люминесценции,

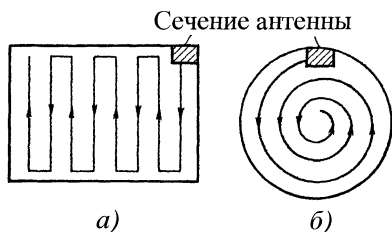


Рис. 2.18. Закон сканирования датчика

смещающие край поглощения, предварительно проявленные фотоматериалы и т.п. Эти устройства обеспечивают разрешающую способность, заложенную в радиоволновом изображении, и обладают инерционностью тепловых процессов.

5. С помощью активного зонда. Производительность этого метода очень мала, однако в настоящее время он применяется при исследовании полей большой площади, создаваемых антенными системами или радиоголографическим способом. Этот метод носит название активного зондирования, так как зонд или принимает часть энергии, или излучает, а приемным устройством является исследуемый объект.

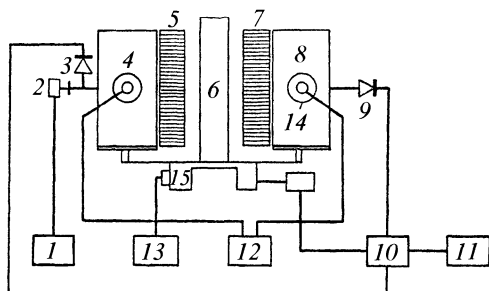


Рис. 2.19. Принципиальная схема линейной антенны:

- 1 – блок питания; 2 – СВЧ-генератор;
- 3 – проходная детекторная секция;
- 4 – передающая антенна; 5 – накладная излучающая антенна; 6 – объект контроля;
- 7 – накладная приемная антенна; 8 – приемная антенна; 9 – детекторная секция; 10 – блок усиления и индикации; 11 – осциллограф;
- 12 – блок управления; 13 – датчик кадровой синхронизации; 14 – вращающееся сочленение, СВЧ – коммутатор; 15 – система линейного перемещения

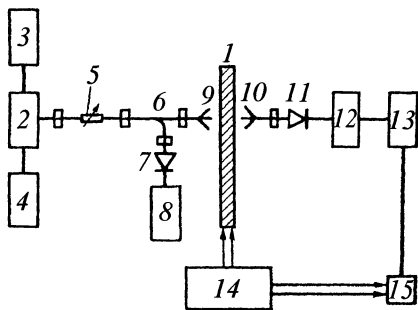


Рис. 2.20. Принципиальная схема одноканального СВЧ-интроскопа с механическим сканированием:

1 – исследуемый объект; 2 – генератор СВЧ-электромагнитных колебаний; 3 – блок питания; 4 – модулятор низкой частоты; 5 – аттенюатор; 6 – ответвитель; 7 – детектор в цепи контроля работы генератора; 8 – контрольный осциллограф; 9 – излучающая антенна; 10 – приемная антенна; 11 – детектор; 12 – усилитель НЧ; 13 – блок визуализации; 14 – автомат движения образца (механизм сканирования); 15 – датчик управления лучом

б. С помощью реактивного зонда. Метод основан на приеме возмущений (рассеяния) электромагнитной энергии, создаваемых реактивным зондом в любой точке исследуемого поля, и переменного по полю анализа.

Принципиальная схема одноканального радиоинтроскопа с механическим сканированием показана на рис. 2.20.

Сверхвысококачественные электромагнитные колебания, образуемые в генераторе 2 и модулированные по низкой частоте, через фидерный тракт подводятся к излучающей антенне 9. Соосно с ней расположена антенна 10. Они образуют канал, зондирующий объект 1.

Принятый сигнал после детектирования и усиления по низкой частоте поступает в блок 13 и управляет интенсивностью свечения лампочки или интенсивностью электронного луча в осциллопической трубке.

Одноканальные радиоинтроскопы имеют преимущества: они просты в изготовлении и эксплуатации.

В качестве приемной антенны в одноканальных радиоинтроскопах с механическим сканированием часто применяют простейший активный зонд – СВЧ-детектор, являющийся индикатором электрической составляющей электромагнитного поля. Детектор представляет собой ненаправленную антенну. Изменение тока в детекторе при малых сигналах пропорционально интенсивности поля в данной точке измерения.

Основные требования, предъявляемые к индикатору, заключаются в том, чтобы при внесении в поле он мало влиял на его распределение. Размер детектора меньше $\lambda/4$. Материал держателя детектора имеет электрические характеристики, близкие к характеристикам среды, в которой распространяется электромагнитный пучок. Держателем служит стержень из пенопласта с $\epsilon' = 1,03$ и длиной $l = 350$ мм.

Детектор укреплен таким образом, что его ось всегда параллельна электрическому вектору поля.

На рис. 2.21, а приведены радиоизображения радиоволнового пучка диэлектрической стержневой антенны в продольном и поперечном сечениях ($\lambda \cong 3,2$ см).

На рис. 2.21, б показано взаимодействие пучка с плоским диэлектрическим образцом толщиной 250 мм, на котором хорошо видна (слева) стоячая волна (поле); $\lambda \cong 3,2$ см; $P_{\text{изл}} = 50$ мВт.

При $\lambda = 8$ мм шаг сканирования в зависимости от решаемой задачи выбирают в пределах 0,5 ... 3 мм. Для получения непрерывного кадра необходимо, чтобы площадь растр-элемента (светового пятна на фотопленке) совпала с квадратом шага сканирования h^2 , умноженного на квадрат масштаба преобразования M^2 . Обычно удобнее иметь круглый растр-элемент с радиусом $R > Mh$, он формируется оптической фотоприставкой. Необходимый масштаб преобразования устанавливают путем удаления фотоаппарата на соответствующее расстояние от лампочки.

Полученное изображение может быть оценено оператором с помощью интерактивного измерителя характеристик. При этом оператор может измерить сигнал в точке изображения, оценить количественно линейные размеры и площади участков, степень анизотропии.

Запись изображения можно получить также на специальной электрохимической или электротермической бумаге и на экранах электронно-лучевых трубок.

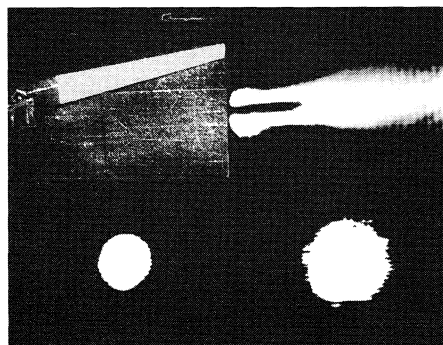
Отличительной особенностью скоростных радиоинтроскопов является наличие многоэлементной линейной антенны, содержащей 32 или 100 волноводных каналов, коммутируемых специальным коммутатором.

Приборами данного класса можно проводить контроль двумя основными методами: на "прохождение" и на "отражение". В последнем случае обе антенны устанавливаются по одну сторону от контролируемого объекта. При наличии накладных съемных антенн в качестве информации можно использовать поляризацию волны. Поэтому в комплекте приборов имеется приемная накладная антенна, у которой входная плоскость волноводов повернута на 90° по отношению к выходной плоскости поляризации излучающей антенны.

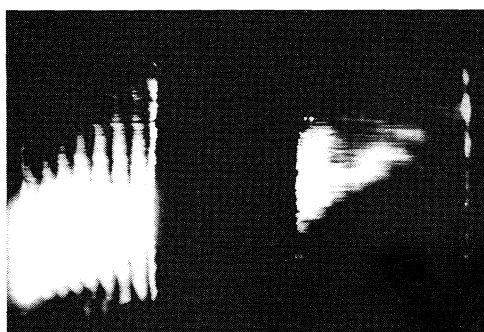
В комплект приборов входит накладная антенна, обеспечивающая работу в режиме дифференциального выделения сигнала, прошедшего сквозь образец.

Дифференциальный режим создается благодаря наличию у излучающей антенны металлического стержня, имеющего двухлепестковую диаграмму направленности, что обеспечивает выделение сигнала только в случае различных условий распространения энергии СВЧ по этим направлениям. Если условия одинаковые, то сигнал отсутствует.

Эти приборы используют для контроля стеклопластиков, керамики, пластмасс, огнеупоров, резины, строительных материалов, покрытий и т.п.



а)



б)

Рис. 2.21. Радиоизображение СВЧ-полей:
а – антенны; б – СВЧ-поля до и после образца

Перспективно применение таких приборов для регистрации полей СВЧ-диапазона 8 и 32 мм, для исследования диаграмм направленности, получения радиограмм, а также в схемах с оптическим формированием радиоизображений.

Радиоинтроскопы с реактивным зондом. Наряду с приборами, в которых используется принцип активного зонда, т.е. имеется приемный зонд, принимающий энергию СВЧ, существуют приборы, работа которых основана на принципе реактивного зонда.

В этом случае сигналом служит принятая антенной рассеянная на реактивном зонде мощность в том месте пространства, где в данное время находится зонд.

Для получения изображения в пространстве перемещается реактивный зонд. Приборы данного класса предназначены

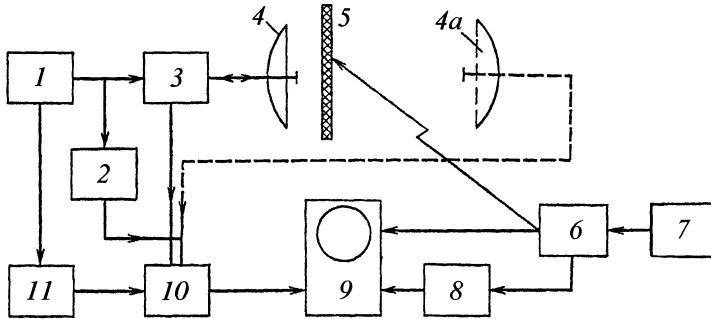


Рис. 2.22. Структурная схема метода реактивного зонда

для контроля качества интегральных схем СВЧ, резонансных систем электроники СВЧ, юстировки антенн, исследований ближневолновых распределений, получения изображений в системах с квазиоптическим формированием радиоизображения, т.е. в основном в тех случаях, когда исследуется поле СВЧ.

Структурная схема реализации метода реактивного зонда приведена на рис. 2.22.

Основным элементом в этой схеме является фотоуправляемая полупроводниковая пластина 5, которая обладает малым темновым возмущением: в неосвещенном состоянии ее параметры не искажают поле в том месте, где находится эта пластина. Если эту пластину в какой-либо точке осветить световым пятном большой интенсивности, то в этом месте резко изменится проводимость материала пластины (коэффициент отражения, преломления и прохождения).

Созданный таким образом реактивный зонд приводит к рассеянию локальной энергии СВЧ, что воспринимается тем или иным приемником 4 (излучающей антенной в моностатической схеме, эталонной антенной в бистатической схеме, детектором в волноводной схеме). С помощью соответствующих схем 3 из принятого сигнала выделяется информация об амплитуде, фазе и поляризации электромагнитного поля в точке падения света на

плоскость фотоуправляемой пластины, и можно получать картину исследуемого поля, т.е. исследовать структуру поля.

Особенностью построения высокочастотной схемы прибора (1, 3, 10, 11) является введение в ее состав канала когерентной компенсации 2, необходимого для выделения малого полезного сигнала СВЧ на фоне постоянной когерентной составляющей, вызванной отражениями от антенны и окружающих предметов, конечным согласованием и направленностью элементов измерительного тракта СВЧ.

Радиоинтроскопы на этом принципе включают лишь следующие блоки: фотоуправляемую пластину 5, оптическое разветвляющее устройство 6, осветительно-проеекционную систему 7, блок индикации 9 и управления 8, который снабжен двухкоординатным самописцем для регистрации результатов контроля.

Такое обособление этих узлов позволяет использовать прибор для исследования электромагнитных полей в диапазоне от субмиллиметровых до сантиметровых волн.

Одним из возможных путей снижения инерционности преобразования является создание многоканальных систем. Ниже дано описание основного на этом принципе амплитудного преобразователя двумерного распределения СВЧ-поля восьмимиллиметрового диапазона в видимое изображение со временем его получе-

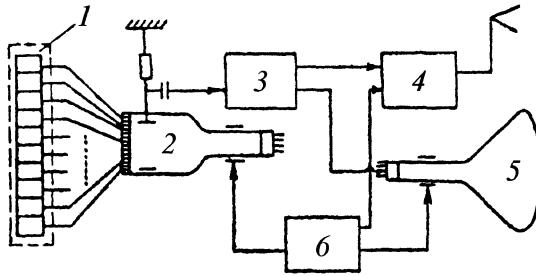


Рис. 2.23. Блок-схема многоканального радиointроскопа

ния 0,02 с, что позволит использовать этот прибор для исследования динамических полей, а также в случаях взаимного перемещения приемника и объекта исследования.

На рис. 2.23. представлена блок-схема прибора, которая включает в себя многоэлементный блок первичного пространственного преобразования 1, электронно-лучевой коммутатор 2, блок усиления и функциональной обработки сигнала 3, блок развертки и синхронизации 6 и индикатор изображения 5. Блок 4 предназначен для дистанционной передачи изображения.

Пространственное разбиение анализируемого поля осуществляется с помощью плоской 100-элементной антенной решетки, выполненной в двух вариантах: в первом случае элементарными излучателями являются пирамидальные рупоры, расположенные в виде шестигранной решетки Браве на площади 400 см², во втором – открытые концы волновода сечением 7,2 × 3,4 мм² в виде прямоугольной решетки на площади 36 см².

Далее, одновременно (параллельно) по каждому каналу, амплитуда микроволновых электромагнитных колебаний преобразуется в пропорциональное ей значение электрического напряжения. В приборе это преобразование осуществляется набором кремниевых СВЧ-диодов, хотя принципиально для этой цели могут быть использованы малоинерционные приемники микроволн.

Таким образом, первый этап преобразования приводит к формированию дискретного распределения потенциалов, соответствующего динамическому распределению интенсивности поля на входе прибора.

Второй этап заключается в преобразовании пространственно-временного распределения потенциального рельефа во временную последовательность импульсов, амплитуда огибающей которых несет информацию об амплитуде СВЧ-колебаний на входе системы. Это преобразование осуществляется электронно-лучевым коммутатором, стеклометаллический экран которого позволяет ввести дискретный потенциальный рельеф с общим числом точек отсчета до 10⁴ в вакуумную часть трубки.

Синхронизация разверток коммутатора и яркостного индикатора позволяет получить выходное изображение пространственно подобным исходному микроволновому распределению. В созданном варианте развертки следующие параметры: частота кадров 50 Гц, число строк в кадре 100. Отсюда видно, что время получения полного изображения, соответствующее периоду кадра, равно 0,02 с, что вполне достаточно для неискаженного зрительного восприятия.

Чувствительность одного канала равна 10⁻⁵ Вт при отношении сигнал/шум порядка единицы, допустимом при визуальной индикации. Эта величина чувстви-

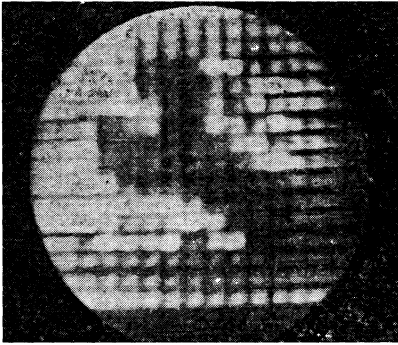


Рис. 2.24. Радиоизображение отражающего объекта (гаечного ключа размером 17 мм) с использованием волноводной антенной решетки

тельности связана с переходным ослаблением и шумами электронно-лучевого коммутатора и может быть повышена с помощью узкополосного поканального предусилителя. Применение предусилителя при том же первичном преобразователе позволяет принципиально повысить чувствительность прибора до значений $10^{-8} \dots 10^{-9}$ Вт на один канал в режиме видеодетектирования и $10^{-12} \dots 10^{-13}$ Вт в синхронном или смесительном режимах.

Пространственное разрешение системы в "теновом" дифракционном режиме работы определяется размерами элементарных антенн решетки и соответственно равно: $2,5\lambda$ – для рупорного варианта и $0,8\lambda$ – для волноводного ($\lambda = 8$ мм).

Существенным недостатком многоканальных систем визуализации является паразитный сигнал, вызванный неоднородностью преобразования по полю анализа. Это явление имеет место и в данном

устройстве, где оно связано с разбросом чувствительности применяемых СВЧ-диодов. Однако, используя отличие пространственных и временных характеристик этой помехи и полезного сигнала, степень влияния неоднородности преобразования можно существенно снизить как с помощью цепей поканального предусилителя, так и чисто телевизионными методами.

На рис. 2.24 приведена фотография дифракционного радиоизображения отражающего гаечного ключа размером 17 мм, полученного на волноводном варианте прибора.

Радиовизор дает возможность непосредственного наблюдения распределения СВЧ-излучений в плоскости его экрана в реальном масштабе времени. Положенный в его основу принцип преобразования интенсивности падающего на экран излучения в тепловую энергию, подогревающую люминофор, обеспечивает широкий спектральный диапазон его работы.

Основной элемент радиовизора (рис. 2.25) – люминесцирующий экран ЛС с нанесенным на него с внешней стороны тонким слоем металла СМ, который является неселективным преобразователем СВЧ и инфракрасного излучения в тепловой рельеф. Экран ЛС с внутренней стороны равномерно освещается ультрафиолетовым светом лампы УЛ, интенсивность которого выбирается в зависимости от среднего уровня падающего излучения путем подбора мощности питания РЭ регулировочными элементами РЭ. Прошедшее или отраженное излучение от контролируемого объекта падает на слой СМ, в значительной степени поглощается им и создает на поверхности люминесцентного слоя различную температуру в зависимости от энергии, попадающей на данный участок. Яркость свечения люминофора зависит от его температуры, и по яркости свечения экрана радиовизора судят о свойствах контролируемого объекта КО, облучаемого от источника излучения ИИ.

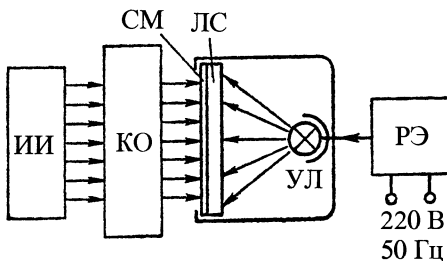


Рис. 2.25. Схема радиовизора

Радиовизор является широкополосным устройством, дает наглядную картину распределения плотности энергии электромагнитного поля, прост в обращении и успешно используется для радиоволнового и теплового контроля. Неудобством при работе с ним является невысокая чувствительность, небольшие размеры изображения и то, что результаты контроля зависят от опыта оператора.

Получение изображения в реальном масштабе времени возможно также с помощью жидких кристаллов и фотоэмульсий (фотопленок), которые восприимчивы к тепловому действию СВЧ-излучения.

Жидкие кристаллы могут быть использованы для радиоволнового контроля так же, как радиовизор, однако они не требуют особого дополнительного освещения, кроме дневного света. Жидкие кристаллы, если это допустимо по техническим условиям на контролируемый объект, могут быть нанесены непосредственно на его поверхность, и при облучении радиоволнами он будет изменять свою окраску в зависимости от нагрева поверх-

ности контролируемого объекта, выявляя тем самым его внутреннее строение и дефекты.

Средства визуализации СВЧ-полей могут быть также применены для получения и анализа интерференционных картин и голографических изображений.

Таким образом, визуализация (получение видимых изображений) распределения физических величин, характеризующих электромагнитное СВЧ-поле (плотности энергии, напряженности электрического или магнитного полей, их компонент и т.д.), необходима для изучения внутреннего строения сложных изделий и для высокой производительности дефектоскопии объектов больших размеров. В результате визуализации получают видимое радиоизображение, анализ которого дает возможность увеличить скорость контроля, облегчает расшифровку результатов для изделий различной формы и позволяет получить документ на весь контролируемый объект сразу. Основные технические данные на некоторые радиоинтроскопы приведены в табл. 2.2.

2.2. Основные технические данные некоторых радиоинтроскопов

Показатели	Тип радиоинтроскопа					
	СС-10К	СС-30К	ДТМ-3	СК-10К	СК-30К	РВ-П
Рабочий диапазон длин волн, мм	8	32	1,8 ... 2,2	2 ... 100	8 ... 150	0,001 ... 30
Размер контролируемого поля, см	60 × 60	80 × 80	15 × 35	10 × 10	150 × 150	12 × 12
Допустимое ослабление сигнала, дБ	До 50	До 55	–	20	20	До 40
Время получения кадра, с	30	30	300	32	32	0,8
Точность определения координат, %	2	5	0,5	2	2	2
Чувствительность интроскопа, Вт/м ²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	–	–	–	10 ... 15
Чувствительность усилителя, мкВ	–	–	–	1	1	–
Пространственное разрешение, мм	1	4	0,01 ... 0,5	0,2 ... 2	1 ... 5	0,3

Развитием радиоинтроскопии стало применение цифровых методов обработки информации и создание на этой базе телевизионных радиоинтроскопов. Для получения телевизионного изображения аналоговый сигнал непосредственно использовать нельзя, так как скорости механического сканирования информационного канала и электронного луча в телевизионной трубке отличаются на четыре порядка. Основой системы является формирователь телевизионного сигнала ФС. Он состоит из аналого-цифрового преобразователя, трансформирующего принятый (после усилителя НЧ) сигнал в цифровой код, необходимый для запоминания, запоминающего устройства и цифро-аналогового преобразователя, формирующего черно-белое или цветное изображение на экране видеоконтрольного устройства. Управляет работой ФС синхрогенератор. При цветном изображении на экране телевизионного приемника формируется также шкала цветности. В отличие от оптической системы телевидения в телевизионном радиоинтроскопе цвета носят условный характер. Интенсивность принятого сигнала в ФС квантуется по отдельным уровням. Цвет определяется не частотой волны, а уровнем его интенсивности в информационном канале. Таким образом, сравнивая цвет того или иного участка изображения со шкалой цветности, можно судить об интенсивности сигнала. ФС по отдельным строчкам запоминает весь кадр и может его воспроизводить на экране телевизионного приемника неограниченное число раз. Для документации результатов контроля изображение записывается на видеоманитофон или фотопленку.

Применение цветного телевидения увеличивает разрешающую способность при контроле изменений толщины и показателя преломления на один-два порядка.

2.4. КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

2.4.1. Измерение диэлектрических характеристик материалов

При решении практических задач выбор методов и средств во многом определяется физическими свойствами сред (материалов) и дефектов. Из числа физических свойств материалов главными являются диэлектрические. Теоретическая оценка результатов взаимодействия СВЧ-радиоволн со средой, определение мощности излучения и чувствительности приемного устройства, точности измерений и разрешающей способности, оценка результатов эксперимента и их оптимизация требуют знания значений электрических параметров сред – диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость в переменном поле является величиной комплексной и записывается в виде

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon'(1 - i \operatorname{tg} \delta).$$

Методы и техника измерений электрических параметров сред в СВЧ-диапазоне радиоволн хорошо описаны в ряде работ. При их выборе следует учитывать конечную цель и необходимую точность измерений. Максимальной точностью измерений обладают резонаторные методы, однако они требуют изготовления образца с очень высокой точностью, что бывает весьма затруднительно. Из волноводных методов практической ценностью обладает способ измерения постоянной распространения в измерительной линии, заполненной образцом, так как он позволяет не только измерить электрические параметры, но и оценить степень неоднородности среды в выбранном направлении. Для оценки параметров плоскостных изделий больших габаритов без какой бы то ни было доработки целесообразно использовать простой метод изме-

рения смещения наклонно падающего пучка.

Рассмотрим основные применяемые на практике методы. Значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_r и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ диэлектрика можно определить, измерив постоянную распространения $\gamma_\epsilon = a_\epsilon + j\beta_\epsilon$ для волновода, заполненного исследуемым материалом. При этом связь между a_ϵ , β_ϵ и ϵ_r , $\text{tg}\delta$ определяется выражениями:

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r, \quad \text{tg}\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}; \quad \text{tg}\delta = \frac{a_\epsilon \lambda_0}{\pi \lambda_{\text{вс}}},$$

$$\begin{aligned} \epsilon'_r &= 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{вс}}}\right)^2 - \left(\frac{\lambda_\epsilon \lambda_0}{2\pi}\right)^2 \approx \\ &\approx \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{вс}}}\right)^2, \end{aligned}$$

где λ_0 – длина волны генератора в свободном пространстве; $\lambda_{\text{кр}} = 2a$ – критическая длина волны H_{10} основного типа; a – размер широкой стенки волновода; $\lambda_{\text{вс}} = 2\pi/\beta_\epsilon$ – длина волны в волноводе, заполненном исследуемым диэлектриком; β_ϵ – постоянная распространения (фазовая постоянная); a_ϵ – постоянная затухания.

Образец исследуемого материала (рис. 2.26) помещается внутрь измерительной линии. При измерении значения ϵ'_r линию необходимо нагрузить на короткозамыкающий поршень; в этом случае точность измерения ϵ'_r около 0,5 %. Для измерения $\text{tg}\delta$ материала на выходе линии устанавливается хорошо согласованная нагрузка ($K_{\text{ст}}U \leq 1,05$). При этом погрешность измерения $\text{tg}\delta$ составляет 10...20 %, а $\epsilon'_r - 1$ %.

Измерение диэлектрических свойств материалов производят по следующей методике. Снимается и строится зависимость выходного сигнала измерительной линии от положения зонда относительно

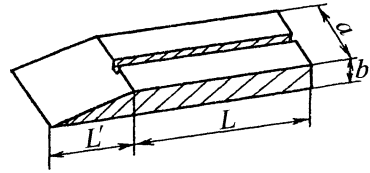


Рис. 2.26. Образец для измерения ϵ'_r и $\text{tg}\delta$ волноводным методом

измеряемого образца. Эта зависимость носит осциллирующий характер, что обусловлено наличием стоячей волны в образце. По расстоянию между двумя соседними минимумами l , а также по значениям напряжения в этих минимумах рассчитывают $\lambda_{\text{вс}} = 2l$ и постоянную затухания:

$$a_\epsilon = \frac{|U_{\text{min}_1} - U_{\text{min}_2}|}{IU_{\text{max}}},$$

где U_{min} и U_{max} – абсолютные значения напряжения в минимуме и максимуме стоячей волны. Используя приведенные соотношения, с учетом измеренных значений $\lambda_{\text{вс}}$ и a_ϵ определяют значения ϵ'_r и $\text{tg}\delta$. Для реализации указанной точности измерений измерительную линию предварительно градуируют на образцах из однородных материалов.

Кроме того, важно знать степень неоднородности материалов, выраженную через пространственную вариацию значений ϵ_r , определяющую в конечном счете погрешность измерения. Неоднородность (%) материалов можно оценить с помощью выражения

$$H = \frac{\sum_1^{n-1} |\Pi_m - \Pi_{m+1}| / n}{\sum_1^n \Pi_m (n-1)} 100,$$

где Π – измеряемый параметр; n – число измерений параметра на различных участках ОК на рабочей длине волны или в рабочем диапазоне длин волн; m – порядковый номер измерения в пределах от 1 до n .

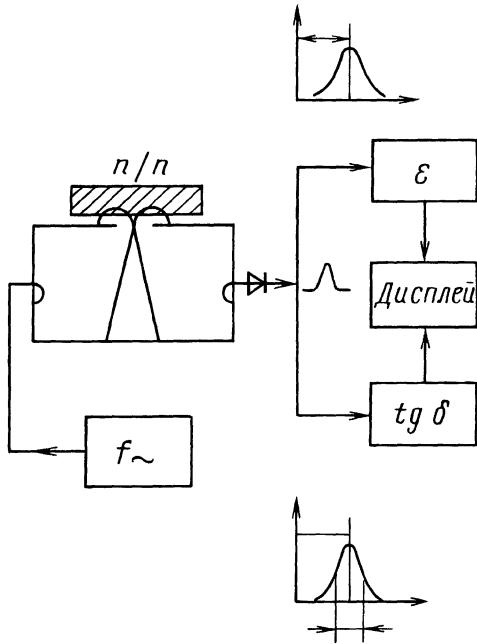


Рис. 2.27. Блок-схема резонаторного СВЧ-метода измерения диэлектрических свойств

Широко применяют резонаторный метод (рис. 2.27).

Цифровой измеритель параметров диэлектриков предназначен для разбраковки диэлектрических и керамических пластин, используемых в электронной технике в качестве подложек интегральных схем.

Принцип измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь исследуемых пластин основан на регистрации изменения резонансной частоты и добротности СВЧ-резонатора, обусловленных комплексной диэлектрической проницаемостью исследуемого материала. Функциональная схема электронного блока прибора состоит из каналов измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, в каждом из которых имеется функциональный преобразователь. Обработку изменений характеристик СВЧ-резонатора данной электронной схемы осуществляли методом временных интервалов, позволяющим использовать

цифровую технику отображения результатов измерений на экране дисплея.

Оригинальной частью прибора является конструкция СВЧ-резонатора, обеспечивающая измерение параметров диэлектрических и керамических пластин с высоким пространственным разрешением, определяемым диаметром отверстия связи резонатора.

Этот метод измерения диэлектрической проницаемости обладает высокой локальностью контроля, но наиболее эффективен для хорошо отражающих материалов и получил применение для контроля электрофизических характеристик полупроводников.

При небольшой толщине контролируемого материала для измерения диэлектрической проницаемости может быть использован метод поверхностных волн.

Измеряя частотную зависимость коэффициента передачи диэлектрического волновода, контактирующего с листовым диэлектриком, удастся определить диэлектрическую проницаемость при известной толщине с точностью $\pm 4\%$ для материалов толщиной 2 ... 20 мм с $\epsilon = 4 \dots 15$. Локальность контроля в диапазоне частот 50 ... 80 ГГц составляет 5×15 мм. Метод характеризуется слабым влиянием величины зазора между датчиком и образцом, изгиба поверхности образца, КСВН СВЧ-тракта. Использование двух диэлектрических волноводов различных типов позволяет одновременно определить диэлектрическую проницаемость и толщину образца при отсутствии априорной информации о них. Правда, точность двухпараметрового контроля примерно в 2 раза хуже, чем однопараметрового. Погрешность однопараметрового контроля ϵ не превышала 4 %, толщины 3 %, в двухпараметровом режиме соответственно 10 ... 12 % и 5 ... 6 %. Время измерения – около 10 с, локальность – от 10×10 до 10×50 мм.

Недостатком метода является ограниченный диапазон толщин контролируе-

мого материала. Это связано с тем, что поле вне датчика экспоненциально затухает. Если диэлектрическая проницаемость контролируемого материала неоднородна в поперечном направлении, наибольший вклад в измеряемую величину будут вносить поверхностные слои со стороны диэлектрического волновода. Состояние поверхности также будет влиять на результаты измерений.

Один из простейших методов измерения относительной диэлектрической проницаемости слабопоглощающих диэлектриков в режиме отражения состоит в анализе наблюдаемой на экране панорамного измерителя зависимости коэффициента стоячей волны от частоты, носящей периодический характер. На частотах, соответствующих минимумам КСВН, выполняется условие $n_i \frac{\lambda_{m\varepsilon}}{2} = h$, эквивалентное тому, что вдоль размера h (толщины образца или изделия) укладывается целое число полуволн. Для определения порядкового номера n_i можно воспользоваться очевидным условием:

$$n_i \frac{\lambda_{n1}}{2\sqrt{\varepsilon}} h; \quad (n_i + m) \frac{\lambda_{n1+m}}{2\sqrt{\varepsilon}} = h,$$

где λ_{n1} соответствует первому наблюдаемому минимуму, а λ_{n1+m} – одному из следующих, отстоящих от первого на m , при условии, что $f_{n1+m} > f_{n1}$.

Тогда

$$n_i = \frac{m\lambda_{n1+m}}{\lambda_{n1} - \lambda_{n1+m}} \text{ и}$$

$$(\sqrt{\varepsilon})^{-1} = \frac{2h(\lambda_{n1} - \lambda_{n1+m})}{m\lambda_{n1}\lambda_{n1+m}}.$$

В отсутствие дисперсии ε в полосе перестройки панорамного измерителя и при постоянстве толщины точность измерения ε не хуже 5 %.

Как известно, все волновые параметры (коэффициенты прохождения и отражения слоя диэлектрика) являются функциями электрической толщины материала,

т.е. произведения толщины на показатель преломления ($h\sqrt{\varepsilon}$). Это обстоятельство существенно затрудняет измерение диэлектрических характеристик в отсутствие информации о толщине. Чаще всего для преодоления неопределенности при раздельном измерении ε и h используют разнообразные варианты многочастотных методов. Так, применяют способ независимого определения ε и h по разности частот между двумя экстремумами коэффициента отражения: для нормального падения (Δf_1) и падения под углом 30° (Δf_2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta f_2^2 \sin^2 30^\circ}{\Delta f_2^2 - \Delta f_1^2};$$

$$h = \frac{c\sqrt{\Delta f_2^2 - \Delta f_1^2}}{4\Delta f_1 \Delta f_2 \sin 30^\circ}.$$

Еще одним широко известным методом измерения диэлектрических параметров материалов является радиоволновая эллипсометрия. Например, в режиме отражения имеет место следующая связь параметров эллипса поляризации с ε' и ε'' материала:

$$\varepsilon' = \frac{[(1-p^2)^2 - 4p^2 \sin^2 \Delta] \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi}{(1+p^2 - 2p^2 \cos \Delta)^2} +$$

$$+ \sin^2 \varphi,$$

$$\varepsilon'' = \frac{4p(1-p^2) \sin \Delta \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi}{(1+p^2 - 2p \cos \Delta)^2},$$

где $p = \Gamma_{||} / \Gamma_{\perp}$ – отношение амплитуд ортогонально поляризованных составляющих; Δ – разность фаз этих составляющих; φ – угол падения.

Однако эти аналитические выражения справедливы для образцов полубесконечной толщины. В случае диэлектрика конечной толщины решение можно получить только численным методом с помощью ЭВМ. К тому же на практике удобнее измерять эллиптичность, т.е. отношение малой и большой оси эллипса поляризации, и азимут-угол, который составляет большая полуось с плоскостью падения.

Для диэлектрических слоев на металле диэлектрическую проницаемость можно контролировать, измеряя только один эллипсометрический параметр отраженной электромагнитной волны – эллиптичность.

Другой способ определения ϵ диэлектрического слоя на металле основан на зависимости максимума эллиптичности от длины волны. Он дает хорошую точность при измерениях в диапазоне ϵ от 1,0 до 1,5.

Однако следует отметить, что практически все эллипсометрические методы связаны с точным измерением углов и имеют приемлемые точности при контроле тонких материалов с малыми (близкими к единице) значениями относительной диэлектрической проницаемости.

В последние годы для определения комплексной проницаемости слоистых диэлектрических структур разработаны методы многочастотных измерений. Методы основаны на измерении частотной зависимости комплексного коэффициента отражения слоистой структуры, синтезировании временных сигналов путем Фурье-преобразования комплексного коэффициента отражения с последующим синтезированием огибающей радиоимпульса, по которой и определяют искомые параметры исследуемой диэлектрической структуры.

Комплекс, реализующий метод, включает ряд стандартной аппаратуры: программируемый СВЧ-генератор Г4-155, имеющий диапазон частот 17,40 ... 25,95 ГГц, рефлектометр панорамного измерителя Р2-66, ЭВМ с накопителем и печатающим устройством, а также ряд специально разработанных блоков: многоканальный цифровой милливольтметр с пределами измерений 10 мкВ ... 10 мВ, временем измерений 120 мс, 10-разрядным АЦП и интерфейсный блок сопряжения с ЭВМ.

В процессе измерений снимают показания рефлектометра сначала в режиме

калибровки (по эталонной отражающей поверхности), а затем при измерении исследуемого образца. Эти массивы данных накапливаются в памяти ЭВМ, а затем обрабатываются до вычисления значений относительной диэлектрической проницаемости (и толщины) каждого из

Кроме того, при выполнении измерений должен соблюдаться целый ряд довольно жестких условий:

1. Расстояние между апертурой излучателя и передней гранью контролируемой структуры должно быть больше общей электрической толщины структуры.

2. Плоскость образца или изделия должна быть перпендикулярна направлению распространения падающего излучения. Допустимое отклонение по углу не должно превышать $\pm 5^\circ$.

3. Исследуемая структура должна быть либо плоской, либо криволинейной радиусом кривизны не менее 1 м. Площадь образца должна быть не менее 100×100 мм, степень шероховатости поверхности не более 0,2 мм. Клиновидность по толщине в пределах облучаемой поверхности не должна превышать 0,03.

4. Уровень отражений от посторонних предметов не должен превышать 30 дБ по отношению к уровню калибровки.

Эти ограничения наряду с большим временем измерений сужают возможности применения этой аппаратуры на реальных объектах, особенно в условиях производственного контроля.

Тем не менее возможность извлечения информации о диэлектрической проницаемости и толщине из многочастотных измерений комплексного коэффициента отражения может быть использована для анализа отклонений от номиналов, поскольку обычно при технологическом контроле имеется полная априорная информация о конструкции изделий.

Для непосредственного измерения диэлектрической проницаемости материалов широко используют интерференцион-

ные СВЧ-методы. Однако эти методы не всегда применимы в случае крупногабаритных изделий и не применимы совсем, если неизвестна толщина контролируемого материала. В этих условиях используют частотно-фазовый метод (переменной частоты).

Диэлектрическая проницаемость материала определяется по формуле

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{4d\Delta f} \right)^2,$$

где c – скорость света.

Для исключения d после измерения разности частот Δf_1 между экстремумами отраженного сигнала, соответствующей неизвестной толщине слоя d , на поверхности этого слоя выбирают часть материала на некоторую глубину Δd и производят аналогичное измерение разности частот Δf_2 , соответствующее оставшейся толщине $(d - \Delta d)$.

В результате

$$\varepsilon = \left[\frac{c(\Delta f_2 - \Delta f_1)}{4\Delta d\Delta f_1\Delta f_2} \right]^2.$$

Метод реализуется при периодическом во времени изменении частоты СВЧ-генератора. Устройство содержит электрически перестраиваемый по частоте СВЧ-генератор, узел разделения падающего и отраженного сигналов, узел обработки отраженного сигнала, приемопередающую антенну и индикатор. При перестройке частоты СВЧ-генератора зависимость результирующего сигнала будет осциллирующей. При известной толщине задача упрощается: в этом случае измеряется разность частот, соответствующая ближайшим экстремальным значениям сигнала. Следовательно:

$$\varepsilon = \left[\frac{c}{4d\Delta f} \right]^2.$$

Зондирование может осуществляться сравнительно широкополосными и в то же время локальными антеннами, например

срезом прямоугольного волновода, диэлектрической стержневой антенной, диэлектрическим (открытым) волноводом и др.

Одной из важных задач, во многом определяющей успех измерений, является правильный выбор рабочей длины волны.

Как показывают исследования, при зондировании поглощающих объектов контроля длина радиоволны должна удовлетворять следующему неравенству:

$$\lambda > \frac{2\pi n d \operatorname{tg} \delta}{\ln J_0 / J_{\text{ш}}},$$

где n – показатель преломления ($n^2 = \varepsilon$); $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала слоя; d – толщина слоя; $J_0 / J_{\text{ш}}$ – отношение начальной интенсивности радиосигнала к интенсивности шумов приемника.

Оценка этого критерия показала, что для контроля изделий из полимерно-композиционных материалов длина волны должна лежать в диапазоне радиоволн 8 ... 30 мм с мощностью СВЧ-генератора не ниже 20 мВт.

Для измерений ε и $\operatorname{tg} \delta$ жидких и сыпучих диэлектриков применяют те же методы, но с использованием измерительных кювет либо проточных измерительных СВЧ-преобразователей (датчиков).

2.4.2. Контроль плотности

При оценке качества и надежности изделий и конструкций необходимо знание ряда физико-механических параметров материалов, из которых они изготовлены. Так, например, одной из основных физических характеристик материала является его плотность. Плотность используется при расчетах большинства других физических и механических характеристик материалов, в частности динамического модуля упругости, коэффициента теплопроводности, коэффициента отражения и др. Кроме того, плотность – важнейшая технологическая характеристика материалов, особенно композитных. От

плотности материалов зависит количественное содержание отдельных компонентов, пористость, степень кристаллизации и отверждения, содержание летучих, неоднородности и т.п. Для оценки плотности материала часто используют фазовый проходной метод в диапазоне радиоволн СВЧ. Этот метод базируется на взаимосвязи между контролируемым физическим параметром среды и ее диэлектрической проницаемостью. Если волна распространяется через изделие конечных размеров, то имеет место явление интерференции волн, претерпевших многократное отражение на границах раздела изделие – воздух. Вследствие этого изменение фазы φ_c является осциллирующей функцией (ε , l), где l – путь. При нормальном падении волны на слой диэлектрика величина осцилляции

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{r^2 \sin^2 \varphi_c}{1 - r^2 \cos^2 \varphi_c},$$

где $r = (\sqrt{\varepsilon} - 1) / (\sqrt{\varepsilon} + 1)$.

Максимальное значение осцилляции

$$\Delta\varphi_m = \arctg \frac{r^2}{\sqrt{1 - r^4}}.$$

В случае неплоской формы изделия из-за рассеяния отраженных волн влияние осцилляции, связанной с многократным отражением, будет меньше.

При проведении неразрушающего контроля фазовым проходным методом параметром будет набег фазы волны, прошедшей через изделие, равный

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{\varepsilon} - 1)l + \Delta\varphi,$$

где λ – длина волны; l – длина пути, по которому волна проходит в изделии. Следовательно, набег фазы, приведенный к базе измерения, будет $\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{\varepsilon} - 1) + \frac{\Delta\varphi}{l}$.

Функциональная связь между ε и плотностью среды Π подтверждается многими исследователями экспериментально. Хорошую сходимость с экспериментальными результатами дает формула

$$\varepsilon = \left[\frac{2}{\pi} (\sqrt{\varepsilon_{ск}} - 1) \arctg \frac{m(1 - \Pi)}{\Pi} + 1 \right]^2,$$

где m – коэффициент, для радиоволновых измерений на огнеупорных изделиях из

большинства окислов $m = \frac{4\sqrt{\varepsilon_{ск}}}{(\sqrt{\varepsilon_{ск}} + 1)^2}$, где

$\varepsilon_{ск}$ – диэлектрическая проницаемость беспористой части "скелета" материала.

Проверка этой формулы показала, что расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превышает 1 % абсолютного значения Π . Она может быть рекомендована для расчета и проверки тарифовых графиков при измерении Π в диапазоне 0 ... 30 %. Для проведения контроля могут использоваться измерительные устройства из типовых элементов и узлов, например простая схема для фазовых измерений с индикацией посредством измерительных линий. Связь между ε и x -смещением минимума (узла) стоячей волны в измерительной линии будет

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{2\lambda_0 x}{\lambda_b d} \right)^2,$$

где λ_0 и λ_b – длины волн соответственно в свободном пространстве и в измерительной линии; d – толщина образца. Рабочую длину волны выбирают из условия обеспечения однозначности измерений:

$$\lambda_0 > d(\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}),$$

где ε_1 , ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости соответственно максимально и минимально возможные (ожидаемые) для контролируемых изделий одной марки.

В указанной классической схеме может быть использован эталонный (калиброванный) фазовращатель, служащий одновременно отсчетным устройством. Процесс измерения заключается в фиксации положения фазовращателя, при котором сигнал с детектора равен нулю (или ми-

нимому). По сравнению со схемой, использующей индикацию посредством измерительной линии, в этом случае достигается меньшая точность измерения.

Фазовый проходной метод получил широкое распространение при неразрушающем контроле качества огнеупорных изделий из различных окислов, в том числе алюмосиликатных, магниевых, хромомagneзитовых, содержащих цирконий, изготовленных полусухим прессованием, шликерным литьем, плавлением. Изделия различны по размерам и конфигурации (прямоугольные и клиновидные с плоскими поверхностями, в виде толсто-стенных цилиндрических и конических тел вращения и др.).

Тарировочные графики строят на основании результатов, полученных при исследовании на изделиях, охватывающих весь ожидаемый диапазон изменения свойств. Погрешность контроля не превышает 1 %. При контроле единичных изделий, например стаканов и плит шибберного затвора, применяемых для разлива стали (когда экспериментальное построение тарировочного графика невозможно), определение зависимости $\Pi = f(\varepsilon)$ производится расчетным путем. При этом точность контроля несколько ниже и зависит от полноты учета маскирующих факторов (дифракции и интерференции, связанной с многократным отражением). Зоны контроля выбирают в соответствии с конкретными потребностями. С целью ослабления влияния дифракции зоны контроля (просвечивания), по возможности, сдвигаются относительно краев изделий (не менее чем на 2 см). В тех случаях, когда требуется провести контроль именно в краевых зонах, например вокруг отверстия в изделии, применяют поглощающие заглушки, перекрывающие прохождение излучения вне зоны контроля. Следует иметь в виду, что в этом случае построение тарировочного графика возможно только по экспериментальным данным.

Для контроля плотности тонких листовых диэлектрических материалов или приповерхностной плотности толстых изделий применяют метод полного внутреннего отражения, реализуемый при одностороннем доступе к объекту.

Основным элементом схем, реализующих метод, является симметричная диэлектрическая призма, основание которой контактирует с исследуемым объектом. На двух боковых гранях устанавливают идентичные рупорные антенны, заполненные диэлектрическим материалом, аналогичным материалу призмы, для согласования ввода и вывода электромагнитной энергии от генератора к детектору. Чувствительность метода и приборов в значительной степени зависит от конкретных параметров и типа приемно-излучающих антенн, их взаимного расположения на боковых гранях призмы, а также от параметров призмы и объекта.

Примером реализации радиоволнового метода для контроля приповерхностной плотности, блоков и плиток из пеноматериалов и других диэлектриков в диапазоне 60 ... 350 кг/м³ служит прибор, работа которого основана на физических явлениях, имеющих место при полном внутреннем отражении электромагнитной волны: проникновении волны в менее плотную среду и продольном смещении максимума отраженного пучка. В результате при угле падения электромагнитной волны, большем критического, и фиксированных положениях передающей и приемной антенн амплитуда принимаемого сигнала изменяется при изменении диэлектрической проницаемости материалов, которая линейно связана с их объемной плотностью (рис. 2.28).

В режиме измерения при увеличении плотности материала амплитуда сигнала уменьшается за счет смещения максимума отраженного пучка от положения, соответствующего максимуму в отсутствие объекта, и тем больше, чем выше плотность объекта. Значение плотности опре-

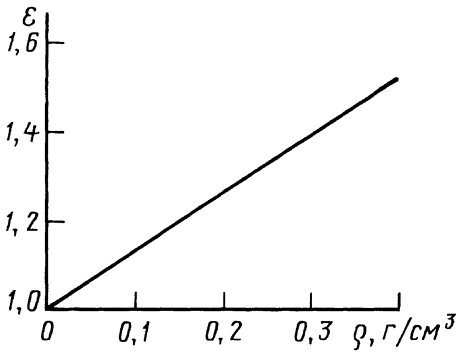


Рис. 2.28. Зависимость диэлектрической проницаемости пенополистирола от плотности

деляются по цифровому индикатору. Для уменьшения переотражений передающая и приемная антенны преобразователя заполнены тем же материалом, что и материал призмы. Глубина контроля 10 мм (в диапазоне радиоволн), площадь зоны контроля $40 \times 40 \text{ мм}^2$, погрешность 3 ... 5 %.

Для измерения плотности снежного покрова (высотой до 5 м) и льда также применяют радиоволновой метод, принцип действия которого основан на использовании явления наклона фазового фронта электромагнитной волны при ее распространении вдоль полупроводящей поверхности. Физическую и количественную трактовку этому явлению дал А.И. Щукин, показав, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon + 1)^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}.$$

Для снежного покрова и выбранной длины волны

$$\left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2 \ll (\epsilon + 1)^2,$$

так что окончательно $\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{\epsilon + 1}}$.

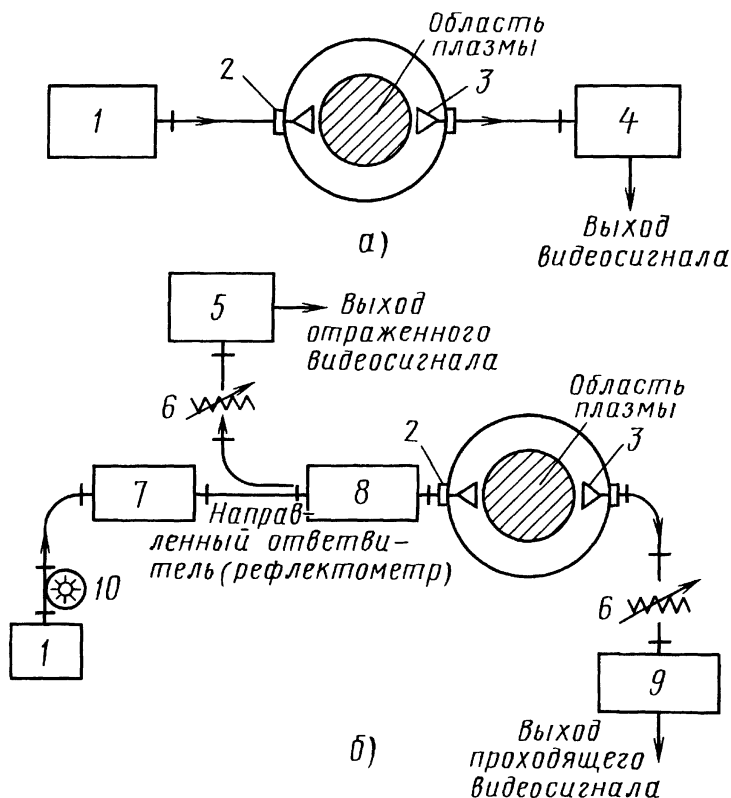
Таким образом, по углу наклона фронта волны можно определить вещественную часть диэлектрической проницаемости снежного покрова или льда, которая линейно связана с их плотностью.

Методика определения плотности снега или льда состоит в следующем. Прибор помещают непосредственно на поверхности контролируемой среды. Индикатор будет показывать некоторую величину сигнала, снимаемого с приемной антенны. Затем приемную антенну поворачивают до тех пор, пока не будет положение "ноль" по индикатору. В таком положении прибор измерит угол наклона фазового фронта волны, а отсчетное устройство автоматически переведет это значение в плотность среды.

Диапазон измерения плотности находится в пределах $0,08 \dots 0,95 \text{ (г/см}^3\text{)}$ при погрешности измерения не более 5 %.

Еще одним примером преимущественного применения микроволн является контроль плотности и других физических параметров плазмы. Микроволновая диагностика плазмы в последние годы получила широкое распространение. Классический газовый разряд и изучение ионосферы, управляемый синтез легких ядер и двигатели космических ракет, плазменные антенны и МГД-генераторы – вот далеко не полный перечень тех областей современных исследований, в которых используют микрорадиоволны для изучения свойств и параметров плазмы.

Столь широкое распространение этот метод получил по ряду причин, в частности из-за его бесконтактности, т.е. его использование не приводит к изменению свойств и параметров измеряемой плазмы, а также потому, что он позволяет получить такие обширные сведения об исследуемом объекте, как, пожалуй, ни один другой метод. Действительно, микроволновая диагностика обеспечивает измерение плотности электронов во времени, ее распределения в пространстве, величины частот соударений электронов с нейтральными или заряженными частицами. Спектр излучения спокойной плазмы для оценки ее температуры позволяет определять турбулентное состояние, исследовать спектр колебаний, присутствующих в плазме, и многое другое.


Рис. 2.29. Блок-схемы установок:

а – по исследованию прохождения волн в плазме; б – отражения; 1 – генератор сигнала; 2 – вакуумные окна; 3 – рупорная антенна; 4 – детектор сигнала (приемник); 5 – детектор отраженного сигнала; 6 – аттенюатор; 7 – калиброванный аттенюатор; 8 – согласующий трансформатор; 9 – детектор проходящего сигнала; 10 – волномер

Это качество – определенная универсальность микроволновой диагностики – обусловлено физическими свойствами плазмы. Плазма – весьма сложный объект исследований. Это среда с сильно выраженными дисперсионными свойствами, изотропная в свободном пространстве и анизотропная в магнитном поле, в ряде условий обладающая нелинейными характеристиками, ее свойства в определенных случаях зависят от граничных условий. Для описания свойств плазмы применяют очень сложный математический аппарат. Измерение параметров такой среды всегда связано с необходимостью толкования результатов отсчетов тех или иных реги-

стрирующих приборов и, по возможности, достаточно четкого представления об условиях измерений и их влияния на получаемые результаты.

Простейшие эксперименты по диагностике изотропной плазмы – эксперименты, в которых исследуется прохождение и затухание микроволн. Плазму, параметры которой необходимо определить, помещают между двумя антеннами. Когда плотность плазмы достигает высокого значения, проходящий сигнал начинает затухать. Интерпретация результатов эксперимента будет весьма проста, если плотность плазмы между антеннами однородна и отсутствуют такие факторы, как

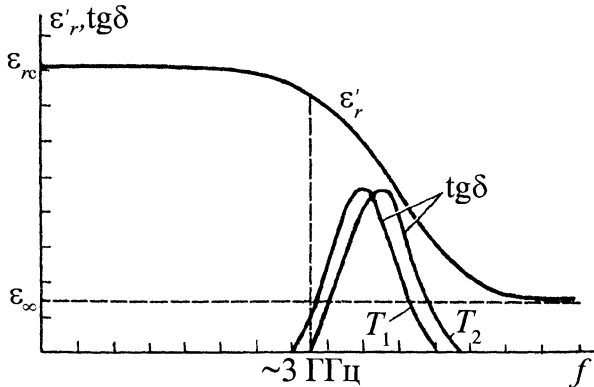


Рис. 2.30. Зависимости ϵ'_r и $\text{tg}\delta$ воды от частоты электромагнитных колебаний;
 T — температура ($T_2 > T_1$)

дифракция, рассогласование, отражение микроволн.

Коэффициент прохождения волны связан с поверхностным и внутренним коэффициентами отражения. Для измерения полного коэффициента отражения к схеме, показанной на рис. 2.29, а, добавляют два элемента: направленный ответвитель и дополнительный детектор. Типичная комбинированная схема показана на рис. 2.29, б. В комплект схемы входят: генератор микроволновых колебаний (обычно лампа обратной волны); волномер; стандартный калиброванный аттенюатор; направленный ответвитель, используемый для регистрации отраженной мощности; согласующий трансформатор, исключающий постоянные источники отражений; вакуумные окна; передающая и приемная антенны; постоянный аттенюатор и микроволновый детектор.

Часто параметры исследуемой плазмы изменяются во времени. Примером может служить плазма, возникающая в ударных волнах и в экспериментах по управляемому термоядерным реакциям. В этих экспериментах плотность электронов в плазме быстро возрастает и затем медленно убывает.

Максимальная плотность плазмы равна $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что соответствует час-

тоте отсечки сигнала порядка 110 ГГц. Этот столб плазмы имеет довольно большой градиент плотности, который приводит к появлению небольшого многократного внутреннего и внешнего отражения сигнала. За счет механизма поглощения энергии амплитуда сигнала, испытывающего внутренние отражения, частично уменьшается.

В результате экспериментов можно сказать, что плазма ведет себя или как прозрачная, или как поглощающая ("черная") среда.

2.4.3. Контроль влажности

Применение радиоволновых методов для определения влажности в материалах и изделиях основано на двух физических явлениях: поглощении и рассеянии радиоволн, что связано с наличием широкополосной вращательной релаксации полярных водяных молекул в области СВЧ.

Информацию о влажности содержат амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны как отраженной, так и прошедшей через влажный материал.

Для увеличения эффективности влагомеров могут быть использованы двухчастотные методы, когда одна из частот находится в области резонансного поглощения электромагнитной энергии молеку-

лами воды ($\lambda \approx 1$ см), или метод переменной частоты.

Быстрое и точное измерение влажности необходимо для обеспечения высокого качества многих видов продукции. Большинство влагомеров СВЧ применяют для управления технологическими процессами в бумажной, строительной, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Применение для этой цели радиоволновых методов основано на контрасте диэлектрических свойств воды и "сухих" (обезвоженных) диэлектрических сред. На рис. 2.30 приведены зависимости ϵ'_r и $\text{tg}\delta$ воды от частоты электромагнитных колебаний. Анализ показывает, что в коротковолновой части диапазона (длина волны 10 см и менее) зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты имеет максимум, а значения ϵ_r еще велики. Для сухих материалов область значений

$\epsilon'_r \approx 1,5 \dots 10$ и $\text{tg}\delta \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$. Таким образом, значения ϵ'_r воды превышают значения ϵ'_r сухих материалов на порядок, а $\text{tg}\delta$ – в сотни раз.

При увлажнении среды получается как минимум двухкомпонентная смесь, диэлектрическая проницаемость которой определяется выражением

$$\epsilon_{\text{см}} = V_{\text{в}}\epsilon_{\text{в}} + V_{\text{с}}\epsilon_{\text{с}},$$

где $\epsilon_{\text{в}}$ – диэлектрическая проницаемость воды; $\epsilon_{\text{с}}$ – диэлектрическая проницаемость сухого материала; $V_{\text{в}}$ и $V_{\text{с}}$ – объемная концентрация воды и материала среды соответственно. Так, в трехсантиметровом диапазоне радиоволн $\epsilon_{\text{в}} = 59$ ($\text{tg}\delta_{\text{в}} = 0,46$), а для пенополистирола $\epsilon_{\text{с}} = 1,5$ ($\text{tg}\delta_{\text{с}} \leq 10^{-3}$). При увлажнении до $W = 10\%$ $\epsilon_{\text{см}}$ меняется, как показано в табл. 2.3.

2.3. Зависимость $\epsilon_{\text{см}}$ от влажности W

$W, \%$	1	2	3	4	5	10
$\epsilon_{\text{см}}$	2,08	2,65	3,23	3,80	4,38	7,25

На рис. 2.31 приведена классическая схема преобразователя СВЧ-влагомера в режиме на прохождение. Чувствительность схемы повышают, вводя опорный (компенсационный) канал, основу которого составляют аттенуатор 7 и фазовращатель 8. Измерения можно автоматизировать, выполнив элементы 7 и 8 электрически управляемыми, и тогда ток управления является мерой влажности ОК.

ОК в случае измерений влажности сыпучих или жидких сред выполняют в виде емкостей (кювет), изготовленных из диэлектрических материалов, например оргстекла, либо используют транспортирующие системы в виде конвейерной резиновой ленты (для сыпучих материалов) или диэлектрической проточной трубы для нефти, химических продуктов и других материалов.

Следует отметить, что если материал мелкодисперсный и диаметр частиц не превышает $0,1\lambda_{\text{с}}$, то влиянием дисперсности частиц можно пренебречь и считать зависимость ослабления электромагнитного излучения материалом от его влажности практически линейной. На рис. 2.32 показана экспериментальная зависимость ослабления N электромагнитного излучения от влажности при $\lambda = 3$ см, полученная на образцах вспененного полистирола толщиной $d_1 = 20$ мм и $d_2 = 30$ мм в режиме контроля на прохождение; раскрыты рупорные антенны 50×50 мм.

Однако в областях малых влагосодержаний и преобладании химически связанной влаги крутизна характеристики значительно меньше, чем в области с преобладанием слабосвязанной влаги: для песка при $W < 7\%$ приращение амплитуды

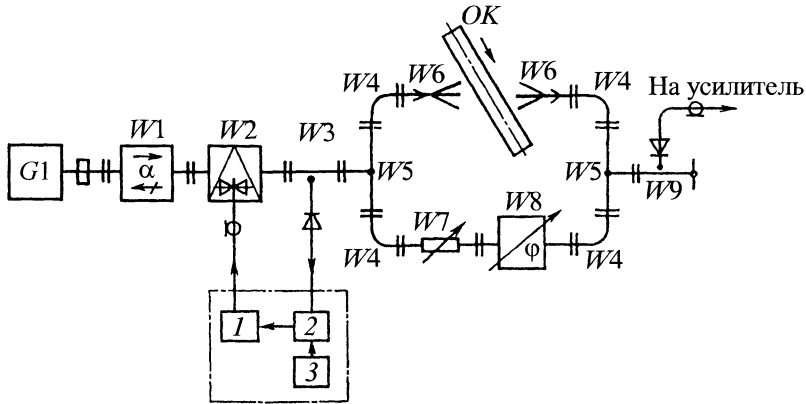


Рис. 2.31. Принципиальная электрическая схема СВЧ-преобразователя влагомера, работающего на прохождение (классическая схема):

1, 2 – соответственно устройства управления и сравнения; 3 – источник стабилизированного опорного сигнала; $W1-W9$ – волноводные элементы

ды A составляет 0,8 дБ/1 %; при $W > 7$ % приращение 2,5 дБ/1 %. Для узкого диапазона влажности эту зависимость можно считать линейной.

Реже применяют схемы на отражение, но они бывают единственно возможными в реализации при одностороннем доступе к ОК. Влагомер, работающий на отражение, может быть построен по амплитудно-фазовой схеме. Такой влагомер обладает высокой чувствительностью, так как в нем обычно используется мостовая схема на основе двойного волноводного тройника. Диапазон измеряемой влажности 15 ... 30 %, погрешность измерения около $\pm 0,5$ % в рабочем диапазоне излучения 10 ГГц. Однако рабочий диапазон

температур ограничен 20 ... 30 °С либо 5 ... 40 °С. Погрешность влагомера зависит от постоянства толщины и плотности материала, а также от надежности работы устройства, фиксирующего положение материала в рабочей зоне датчика.

Чтобы исключить влияние толщины, используют метод "бесконечного" слоя, т.е. метод поверхностного отражения, выбирая более короткую длину волны в миллиметровом диапазоне. С другой стороны, для уменьшения влияния шероховатости, неоднородностей структуры и для объемных измерений влажности предпочтительней длинноволновый участок диапазона радиоволн СВЧ. Таким образом, при выборе длины волны СВЧ-влагомера необходимо найти компромиссное решение исходя из конкретных требований и условий контроля. В амплитудных СВЧ-влагомерах, работающих в режиме на отражение, в качестве основного элемента часто используют направленный ответвитель или циркулятор для разделения падающей и отраженной от объекта контроля волн. Следует отметить, что в некоторых случаях для повышения точности СВЧ-влагомера совмещают оба режима

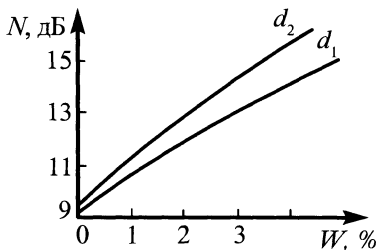


Рис. 2.32. Зависимость ослабления СВЧ-излучения, прошедшего через слой вспененного полистирола, от его влажности

работы – на прохождение и отражение, используя при этом канал отраженной волны для компенсации или внесения поправок в результат контроля.

Учитывая в общем случае осциллирующий характер зависимостей модуля и фазы коэффициента отражения (а следовательно, и коэффициента прохождения) от диэлектрической проницаемости материала, связанной с влажностью, а также от толщины ОК, можно сделать вывод о неоднозначности результатов измерения влажности и необходимости поиска способов подавления влияния мешающих факторов. Одним из таких способов является электрическая перестройка частоты генератора СВЧ с измерением среднего значения информативного сигнала. Для достижения желаемого результата необходимо электрически перестраивать генератор СВЧ в полосе частот не менее 4 ... 5 ГГц.

На рис. 2.33 показана структурная схема СВЧ-влажмера восьмимиллиметрового диапазона, реализующего электрическую перестройку частоты. Используют амплитудный метод обнаружения и индикации влаги в диэлектрических теплозащитных материалах, покрывающих металлические конструкции. Коэффициент отражения радиоволн от диэлектрика с весьма малыми потерями, нанесенного на металл, близок к единице. При наличии влаги (в результате возрастания в диэлектрике потерь) коэффициент отражения от металла резко уменьшается. Для снижения влияния изменений толщины контролируемого материала и зазора между преобразователем и объектом контроля генератор СВЧ работает в полосе частот, а отраженный сигнал принимается асинхронно, т.е. по среднему значению. Превышение порогового значения влажности отображается индикатором.

Прибор весьма чувствителен к влажности в слабо поглощающих сухих диэлектрических материалах, нанесенных на металлическую подложку.

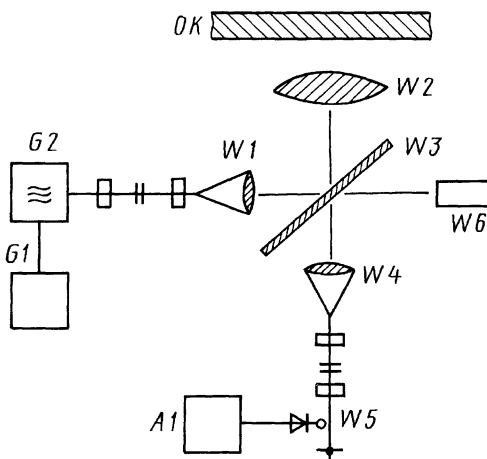


Рис. 2.33. Принципиальная схема СВЧ-преобразователя индикатора влаги:
 A1 – предусилитель; G1 – модулятор (генератор пилы); G2 – генератор; W1 – передающая антенна; W2 – формирующая линза; W3 – ответвитель; W4 – приемная антенна; W5 – детекторная секция; W6 – нагрузка; ОК – объект контроля

При контроле резонаторным или волноводным методом исследуемый материал вводят в полость волновода или резонатора, т.е. в этом случае размеры образца ограничены и по существу сам прибор не обеспечивает бесконтактности измерения. В то же время благодаря локализации волн в полости повышается чувствительность влагомера и создается возможность измерения характеристик материала при малых значениях влагосодержания и массы образца.

В волноводных влагомерах используется влияние диэлектрических свойств материала, введенного в волновод, на характеристики, определяющие распространение радиоволн СВЧ в волноводе. Например, можно измерять амплитуду и фазу волны до установки образца и после нее или полное волновое сопротивление на входе волноводной секции с образцом.

Основное препятствие для применения влагомеров этого типа в производственных условиях – трудности, связанные с

введением материалов в волновод и привязкой их к поточным линиям. Их применяют для контроля влажности листовых материалов и жидкостей. Для тонких листовых и нитевидных материалов (бумага, текстильные ткани, синтетические волокна) в измерительном волноводе делают узкую прорезь по оси волновода вдоль линий напряженности электрического поля.

Влагомеры резонаторного типа основаны на принципе измерения параметров резонатора при введении исследуемого материала.

Из резонаторных влагомеров следует выделить такие, у которых конструкция резонатора позволяет измерять влажность материалов в потоке (резонаторы проточного, щелевого и открытого типа). Тип резонатора определяется видом контролируемого материала: для сыпучих и жидких материалов и листовых – резонаторы щелевого или открытого типа. Проточный резонатор может быть сделан, в частности, в виде цилиндрического резонатора с коаксиальной диэлектрической трубкой, значение ϵ которой достаточно мало; щелевой – в виде закороченного волновода с излучающими отверстиями в широкой стенке; открытый – в виде двух хорошо отражающих пластин, размеры которых значительно превышают длину волны колебаний основного типа (во избежание излучения).

Резонаторные влагомеры могут быть однорезонаторными и двухрезонаторными, настроенными по принципу компарирования. Полуавтоматический влагомер с классическим резонатором имеет точность измерений влажности 0,1 ... 0,5 % при стабильной температуре и плотности материала.

Снизить влияние толщины материала на результаты контроля влажности можно, используя резонансный метод, предложенный Е.Ф. Кондратьевым. При внесении в резонатор объекта контроля резонансная частота изменяется на Δf относи-

тельно начального значения f_0 , соответствующего пустому резонатору, так что $\Delta f/f_0 = -\eta(\epsilon'_r - 1)/2$, где ϵ'_r – действительная часть диэлектрической проницаемости образца; η – коэффициент заполнения, который в простейшем случае определяют по формуле $\eta = \epsilon'_r V_{\text{обр}}/V$, где $V_{\text{обр}}$ – облучаемый объем образца; V – объем резонатора. Тогда $V_{\text{обр}}/V = -2\Delta f/f_0 [\epsilon'_r (\epsilon'_r - 1)]$.

Уменьшение добротности резонатора

$$\Delta Q = Q_0 - Q_\epsilon = Q\epsilon''_r \quad \eta = 2\Delta f Q\epsilon''_r / f_0 (\epsilon'_r - 1),$$

где Q_0 – собственная добротность; Q_ϵ – добротность резонатора с образцом; $Q = (Q_0 + Q_\epsilon)/2$; ϵ''_r – мнимая часть диэлектрической проницаемости образца.

Изменение напряжения ΔU на квадратичном детекторе, связанном с резонатором, при изменении добротности на ΔQ

$$\Delta U = kP\Delta Q / (2\pi f_0),$$

где k – коэффициент преобразования детектора; P – мощность, отдаваемая генератором в резонатор.

После соответствующих преобразований получим

$$\Delta U = \frac{kP\Delta f Q}{\pi f_0^2} \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r - 1}.$$

Из этого выражения следует, что сигнал на детекторе чувствителен как к ϵ''_r , так и к ϵ'_r . Результаты эксперимента показали, что при реализации описанного метода амплитуда напряжения сигнала слабее зависит от толщины ОК, чем от влажности. Например, относительное изменение амплитуды сигнала при резонансе, соответствующее изменению толщины образца в 4 раза, составляет всего 0,03, а относительное изменение амплитуды напряжения при изменении влажности на 1 % (в диапазоне 0 ... 10 %) – 0,05.

Структурная схема прибора, использующего резонансный метод, изображена на рис. 2.34. В качестве генератора СВЧ

использован серийный полупроводниковый генератор Ганна М 31106 трехсантиметрового диапазона радиоволн, настроенный на частоту 10,13 ГГц. Развязывающим элементом служит стандартный ферритовый вентиль 3ВВ-100Б. Проходная детекторная секция выполнена на диоде ДКВ-8. В качестве полукрытого резонатора используется волноводный переход с прямоугольного сечения 23×10 мм на круглое сечение диаметром 30 мм; длина перехода 100 мм. Полуоткрытый резонатор отделен от волноводной системы круглой диафрагмой диаметром 8 мм. На выходном круглом фланце резонатора укреплена защитная пластина из фторопласта толщиной в половину длины волны в диэлектрике.

При настройке прибора выходное сечение полуоткрытого резонатора закрывают металлической пластиной, чтобы получить закрытый резонатор, и определяют собственную частоту этого резонатора. Затем частоту генератора уменьшают на величину Δf , чтобы резонанс наступал при удалении короткозамыкающей пластины от выходного фланца на некоторое расстояние. Частота генератора СВЧ выбирается такой, чтобы в момент резонанса расстояние от торца полуоткрытого резонатора до поверхности ОК составляло 6 ... 10 мм, чем обеспечивается бесконтактный процесс измерения влажности. Следовательно, резонансная система, образованная диафрагмой, волноводным переходом, воздушным зазором и эффективной отражающей поверхностью ОК, может быть названа полуоткрытым резонатором.

Такой резонатор перестраивается плавным изменением воздушного зазора (перемещением отражающей поверхности объекта, образца) в направлении нормали к выходному фланцу. Момент совпадения резонансной частоты с частотой питающего генератора СВЧ может быть зафиксирован по характерному изменению амплитуды и фазы стоячей волны в волноводе,

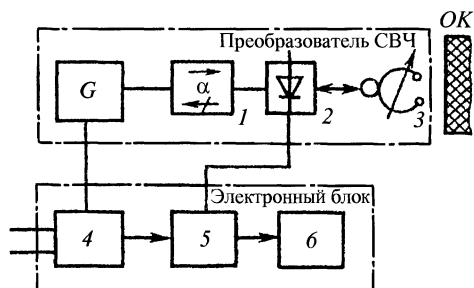


Рис. 2.34. Структурная схема резонансного влагомера:

- G – СВЧ-генератор; 1 – вентиль;
 2 – проходная детекторная секция;
 3 – полуоткрытый резонатор; 4 – источник питания; 5 – усилитель; 6 – индикатор

соединяющем генератор с полуоткрытым резонатором. При правильном расположении детектора относительно узлов и пучностей стоячей волны напряжение на выходе детектора имеет экстремальное значение в момент резонанса. Окончательное положение рабочего детектора подбирается экспериментально, а первоначальная установка производится в сечении, совпадающем с узлом напряженности электрического поля стоячей волны при закрывании полуоткрытого резонатора металлической пластиной.

Предварительная градуировка индикатора прибора производится на имитаторах в виде набора диэлектрических пластин из материалов с известными значениями диэлектрической проницаемости.

В частности, 1 %-ной влажности соответствует $\epsilon_r = 2,08$, имитатором может быть тефлон с $\epsilon_r = 2,02$; 2 %-ной влажности соответствует $\epsilon_r = 2,65$, в качестве имитатора может быть использовано оргстекло ($\epsilon_r = 2,61$).

Перед началом работы устанавливают индикатор в положение "ноль" при максимальной чувствительности прибора и преобразователя СВЧ, направленного на свободное пространство. Затем к преобразователю (торцу полуоткрытого резонатора) подносят сухой образец, при этом стрелка индикатора едва отклоняется

($\leq 1,5 \dots 2$ деления). Образец взвешивают, равномерно увлажняют (распылением) до 1 % от массы образца и фиксируют резонанс. Погрешность измерения около 1 % в диапазоне влажности до 80 %. В табл. 2.4 приведены технические характеристики некоторых СВЧ-влагомеров.

2.4.4. Контроль технологических параметров (вязкости, отвердевания, вулканизации, гомогенности и т.п.)

Радиоволновые методы и приборы контроля вязкости полимерных материалов и связующих, содержания компонентов, процесса отвердевания связующего, вулканизации и гомогенности резиновых смесей основаны на использовании корреляции между искомыми параметрами и диэлектрическими свойствами среды. Все указанные процессы сопровождаются кинетикой внутреннего преобразования состояния, структуры состава, что вызывает изменение физических, а следовательно, и диэлектрических свойств.

Одним из важнейших технологических параметров, ответственным за качество готовых изделий, является вязкость. Вязкость характеризует реологические свойства растворов и расплавов полимеров.

Особенно важна роль вязкости в технологических процессах переработки полимерных материалов в изделия. В случае переработки композиционных материалов необходимо рассматривать вязкость связующего и вязкость композиционного материала, пропитанного связующим (полуфабрикат). Наибольшее значение имеет вязкость связующего, так как ее изменение может привести к нарушению условий пропитки и, в итоге, к образованию дефектов и значительному изменению свойств готового изделия.

Последствия нестабильности вязкости связующего при пропитке армирующего материала следующие:

1. Неравномерность пропитки армирующего материала, т.е. количества связующего, проникшего в межволоконное пространство.

2. Нарушение адгезионной связи связующего с волокном. Доказано, что изменение пространственной структуры и гибкости молекул полимера у поверхности волокна, особенно недостаточная гибкость макромолекул в растворе (повышенная вязкость раствора), может служить причиной образования рыхлого слоя на границе связующее – волокно.

3. Неравномерность толщины слоя связующего на поверхности армирующего материала.

Из сказанного очевидно, что для поддержания оптимального значения вязкости связующего и управления качеством пропитанного материала (полуфабриката) необходим непрерывный автоматизированный контроль вязкости связующего, а также полуфабриката как при "сухом", так и при "мокроем" способе намотки изделий из полимерных материалов. Причем контроль вязкости полуфабриката имеет большее значение при сухом способе, так как она в значительной степени зависит от сроков хранения, содержания растворителя и температуры. Важное значение приобретает выбор наиболее эффективных методов и средств контроля вязкости связующего и полуфабрикатов.

Радиоволновые методы основаны на взаимодействии волн СВЧ-диапазона с контролируемой средой. При изменении электрических параметров среды (связующего) – проводимости, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь – вследствие изменения вязкости среды, вызванного желатинизацией или полимеризацией связующего, изменяются параметры распространяющихся микрорадиоволн сантиметрового или миллиметрового диапазона, измеряемые данным методом (сдвиг фазы, затухание, поворот плоскости поляризации, коэффициент стоячей волны, амплитуды СВЧ-колебаний и др.).

Ис числа радиоволновых методов широкое распространение получили методы свободного пространства, резонаторный и волноводный.

Типичная схема СВЧ-вискозиметра приведена на рис. 2.35.

2.4. Технические характеристики влагомеров

Прибор	Страна	Диапазон измеряемой влажности	Температурный диапазон, °С	Погрешность измерения, %	Условия автоматизации измерений	Принцип действия	Назначение
Влагомер	Россия	10 ... 30	5 ... 40	$\pm 0,3 (W = 10 \dots 20 \%)$ $\pm 0,50 (W > 20 \%)$	Неавтоматический	Ослабление на "просвет", амплитудная коррекция по таблицам поправок	Промышленный образец. Измерение влажности сыпучих материалов
Влагомер МХ110	США	3 ... 10	—	$\pm 0,2$ (индивидуальная градуировка) $\pm 0,5$ (градуировка по сортам) $\pm 1,5$ (усредненная градуировка)	То же	Ослабление "на просвет", амплитудная коррекция	Промышленный влагомер. Измерение влажности бумаги
Влагомер СВЧ ММ600	США	1 ... 25	—	$\pm 0,1 (W = 1 \%)$ $\pm 0,25 (W = 25 \%)$	Автоматический	Ослабление "на просвет"	Контроль работы бумагоделательной машины "БМ"
Влагомер СВЧ МХ100	Англия	—	—	± 1	То же	Ослабление на "просвет", амплитудная механическая коррекция плотности. Циклическое интегрирующее устройство	Промышленный образец. Измерение влажности сыпучих материалов на ленте конвейера
Влагомер СВЧ М2000 переносной	Англия	2 ... 15	7 ... 36	0,25	Полуавтоматический со сменными головками	Ослабление на "просвет", амплитудная температурная компенсация и автоматическая коррекция массы, независимость от направления волокна	Измерение влажности бумаги

Продолжение табл. 2.4

Прибор	Страна	Диапазон измеряемой влажности	Температурный диапазон, °С	Погрешность измерения, %	Условия автоматизации измерений	Принцип действия	Назначение
Влагомер СВЧ700	ФРГ	0,9 ... 95	-	-	Автоматический	Ослабление на "просвет"	Измерение влажности глины и керамических порошков на поточных линиях
Влагомер СВЧ	США	-	-	$\pm 0,3$	Неавтоматический	Ослабление на "просвет", фазовый	Измерение влажности бумаги
Амплитудно-фазовый	Россия	10 ... 30	-	4 без коррекции; 1-1,2, с коррекцией	Автоматический	Ослабление на "отражение", фазовый	Измерение влажности листовых материалов
Влагомер СВЧ ММW161	Польша	0 ... 100	10 ... 55	0,3 ... 1	То же	Ослабление на "просвет", амплитудно-фазовый	Промышленный образец. Измерение влажности твердых и сыпучих материалов
Влагомер СВЧ ММW162	Польша	0 ... 100	10 ... 55	0,3 ... 1	То же	Ослабление на "просвет", амплитудно-фазовый	Промышленный образец. Измерение влажности листовых материалов $\rho = 30 \dots 300 \text{ г/см}^3$

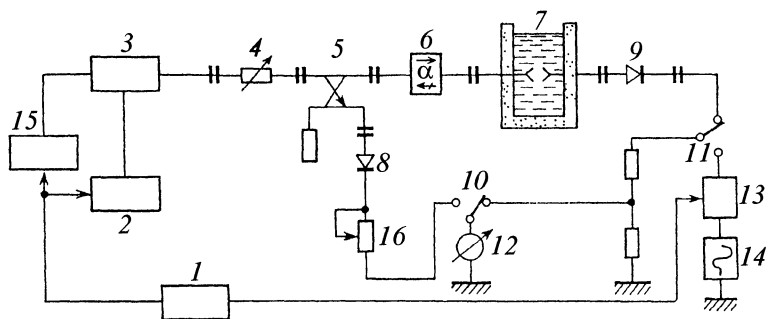


Рис. 2.35. Схема вискозиметра

Измерительный преобразователь представляет собой рупорные передающую и приемную антенны. Раскрыв антенны сделан в плоскости E .

Для герметизации раскрыты антенн помещены в пустотелые цилиндры, на открытый конец которых навинчены тонкостенные фторопластовые крышки. Фторопласт выбран для наилучшего согласования антенн с нагрузкой. В зависимости от степени поглощения электромагнитных волн в контролируемом связующем антенны устанавливают и фиксируют хомутами на нужном расстоянии. Измерительный преобразователь с блоком измерения соединяют волноводным трактом, профиль которого выгибается по месту.

Использование СВЧ-вискозиметра устраняет необходимость взятия проб для анализа, дает непрерывную информацию о вязкости, улучшает условия труда, обеспечивает требуемую пропитываемость стеклоленты и позволяет автоматизировать процесс контроля.

Важной характеристикой технологического процесса пропитки является содержание связующего в композиции.

На основании проведенных исследований по выбору оптимальной схемы СВЧ-устройства была выбрана схема на отражение с направленным ответвителем. Датчик СВЧ-установки – рупорная антенна, расположенная с одной стороны ленты. Такой датчик с односторонним доступом позволяет вести контроль содержания

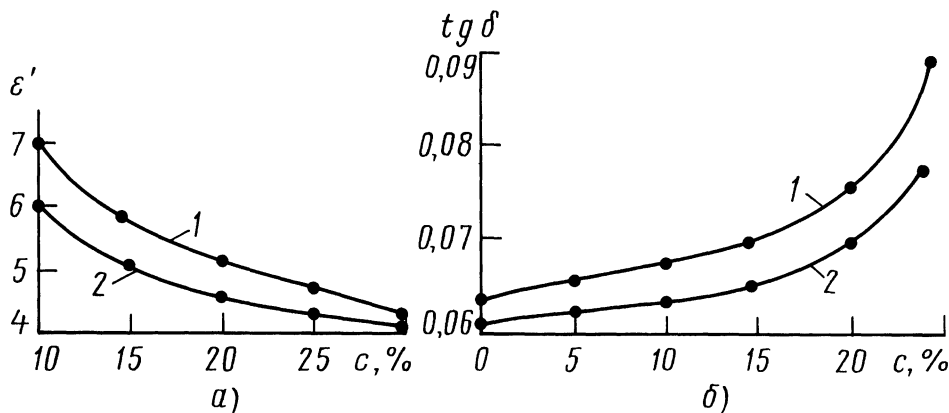


Рис. 2.36 Зависимость ϵ_r' (а) и $\text{tg}\delta$ (б) стеклопластика на основе нити ВМС от содержания связующего ЭДТ-10 на частотах 9750 (1) и 37500 (2) МГц

контроль содержания связующего в ленте в момент прохождения ее через фторопластовый или металлический ролик. Эта особенность исключает колебание ленты относительно датчика (антенны). Непосредственно датчик имеет малые размеры, он бесконтактный, поэтому на него не налипает связующее с ленты.

Также сняты зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и $\text{tg}\delta$ от содержания связующего для стеклопластиков на основе нити ВМС и ВМПС и органопластиков на основе нити СВМ, пропитанных связующими ЭДТ-10, УП-612М, ДДЦПДМ. Измерения проводились на частотах 9750 и 37500 МГц в интервале температур 20 ... 60 °С. Содержание связующих изменяли от 15 до 50 %. На рис. 2.36 приведены полученные зависимости для стеклопластиков на основе нити ВМС, пропитанных связующим ЭДТ-10.

Анализ полученных результатов показывает, что при малом (около 10 %) содержании связующего значения ϵ' и $\text{tg}\delta$ определяются диэлектрическими характеристиками стеклооргановолокна. С ростом содержания связующего (независимо от его типа) ϵ' уменьшается, $\text{tg}\delta$ возрастает по закону, близкому к тангенциальному.

При отверждении связующего изделия из армированных пластиков приобретают прочность, теплостойкость и другие физические свойства. Отверждение происходит в результате взаимодействия реакционноспособных групп связующего между собой. Отверждение протекает по механизму полимеризации или поликонденсации. Качество отверждения изделий из армированных пластиков оценивается степенью отверждения.

Степень отверждения связующего в армированных пластиках в производственных условиях в настоящее время определяют методом экстрагирования. Сущность его в том, что после отверждения изделий из армированного пластика отбирают пробы с технологических припусков,

из которых затем с помощью растворителя извлекают неструктурированные молекулы полимера, по числу которых и оценивают степень отверждения. При такой методике определения степени отверждения контролю подвергают не изделие, а технологические припуски. Контроль изделия, следовательно, проводится лишь косвенно. К тому же результаты контроля становятся известны лишь после завершения отверждения, что затрудняет изучение кинетики процесса и исключает возможность управления скоростью реакции в различных участках изделий, особенно крупногабаритных. Это может быть причиной появления внутренних напряжений, пористости, растрескивания, а следовательно, понижения механической прочности изделий. Для получения качественных изделий необходимо полное завершение отверждения связующего в материале изделий.

При отверждении связующее переходит из вязкотекучего в твердое стеклообразное состояние, что связано с образованием трехмерного полимера. Механизм взаимодействия электромагнитных волн в процессе отверждения стеклопластиков изучен пока недостаточно. Полимерные молекулы эпоксидных связующих состоят из большого числа полярных звеньев, вследствие чего в электрическом поле они не ориентируются как жесткое поле, а происходит ориентация отдельных звеньев. Степень подвижности полярных звеньев определяет энергию, необходимую для их ориентации в переменном электрическом поле, т.е. диэлектрические потери. Сшивание молекул при отверждении связующего уменьшает подвижность полярных звеньев, что приводит к существенному изменению их диэлектрических свойств: ϵ и $\text{tg}\delta$ уменьшаются, а удельное объемное электрическое сопротивление и электрическая прочность повышаются.

Зависимость ϵ' от степени отверждения снимают следующим образом. Исследуемый диэлектрик толщиной d помещают в волновод вплотную к коротко-

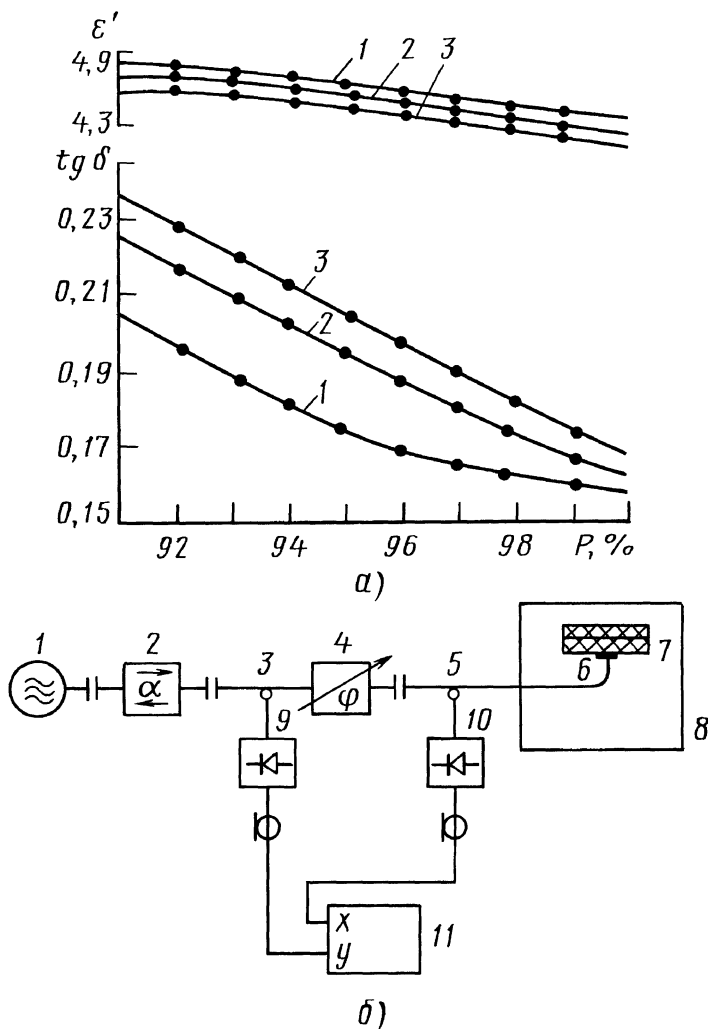


Рис. 2.37. Зависимость ϵ' и $\text{tg } \delta$ (а) от степени отверждения стеклопластика на основе стеклонити ВМС и ВМПС, пропитанного связующим ЭДТ-10, на частотах 1 МГц (1), 9750 МГц (2) и 37500 МГц (3); схема установки контроля отверждения (б):

1 – СВЧ-генератор; 2 – вентиль; 3, 5 – емкостные зонды; 4 – фазовращатель; 6 – волноводный изгиб; 7 – образец; 8 – сушильный шкаф; 9, 10 – детекторы; 11 – двухкоординатный самописец

замкнутой пластине и стенкам волновода. Проводят измерение неотвержденного образца. Затем заполненный волновод и образец стекло- или органопластика помещают на 2 ч в печь, нагретую до заданной температуры. После двухчасовой выдержки волноводные секции вынимают из печи и от образца отрезают часть на хи-

мический анализ для определения степени отверждения. После измерения ϵ образец снова помещают в печь. Цикл измерений заканчивается по достижении образцом степени отверждения 98 ... 100 %. Время, температура и скорость нагрева соответствуют технологическому режиму отверждения изделий.

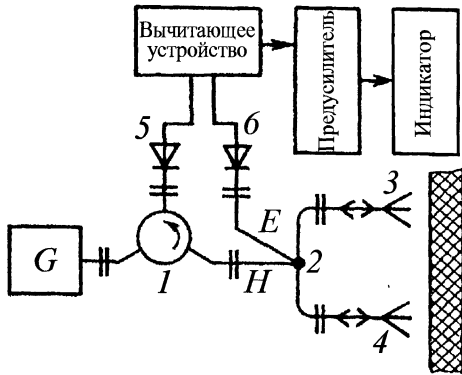


Рис. 2.38. Функциональная схема СВЧ-преобразователя прибора:

1 – циркулятор; 2 – двойной волноводный тройник; 3, 4 – приемно-передающие антенны; 5, 6 – детекторные секции

На рис. 2.37, а приведены характерные зависимости ϵ' и $\text{tg}\delta$ от степени отверждения стекло- и органопластиков. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что по мере отверждения пластика ϵ' уменьшается, причем в конце процесса уменьшается равномерно на 0,5 для стеклопластиков и на 0,3 ... 0,4 – для органопластиков при изменении степени отверждения на 1 %. С ростом частоты ϵ' по абсолютной величине уменьшается.

Тангенс угла диэлектрических потерь с возрастанием степени отверждения также уменьшается. Для стеклопластиков на основе нити ВМС он снижается примерно на 0,006 при возрастании степени отверждения на 1 % (конец отверждения). Для органопластиков изменение составляет 0,003.

С ростом частоты $\text{tg}\delta$ возрастает. В конце процесса отверждения характер изменения ϵ' и $\text{tg}\delta$ на частоте 9750 МГц совпадает с изменением ϵ' , $\text{tg}\delta$ на частоте 37500 МГц. Однако при разработке установки для определения степени полимеризации был выбран трехсантиметровый диапазон длин волн, так как в этом диапазоне меньше сказываются температурные изменения.

Для непрерывного автоматического контроля степени отверждения ПКМ в изделиях в процессе их изготовления была создана двухзондовая СВЧ-установка, электрическая схема которой приведена на рис. 2.37, б.

СВЧ-излучение от генератора 1, работающего в непрерывном режиме, направляется через последовательно соединенные вентиль 2, первый емкостной зонд 3, фазовращатель 4, второй емкостной зонд 5, волноводный изгиб с фланцем 6 на образец 7. Сигналы, снимаемые с зондов, детектируются детекторами 9, 10 и посредством коаксиальных кабелей подаются на входы двухкоординатного самописца 11.

В качестве СВЧ-генератора используют серийный генератор на лавинопролетном диоде трехсантиметрового диапазона типа ГЛПД-1. Вентиль 2 предназначен для развязки генератора от измерительной схемы. Положение фазосдвигающей пластины 4 подбирают таким, чтобы электрическое расстояние βl , где $\beta = 2\pi/\lambda_w$, l – геометрическое расстояние между зондами, было равно $1/8\lambda_w$. Пластина из высокочастотной керамики обеспечивает сдвиг фаз на 220° .

Установка работает следующим образом. В результате воздействия электромагнитной волны на изделие в линии передачи устанавливается стоячая волна, фаза и модуль коэффициента отражения которой изменяются в процессе отверждения и нагревания образца. Эти изменения улавливаются зондами и регистрируются двухкоординатным самописцем.

Преимуществом данной схемы является возможность избежать мешающего влияния температурных изменений в образце.

В производстве полимерно-композиционных материалов и особенно при автоматизированном приготовлении резиновых смесей важное значение приобретает своевременный контроль гомогенности (однородности) состава материала. Схема радиоволнового прибора, предназначенно-

го для бесконтактного экспресс-контроля гомогенности резиновых и других диэлектрических смесей, показана на рис. 2.38. Действие прибора основано на сравнении коэффициентов отражения от двух соседних участков ОК.

Если диэлектрические свойства этих двух участков различны или на одном из участков имеется дефект, то на выходе моста СВЧ появляется сигнал разбаланса. Этот сигнал усиливается и передается на индикаторное устройство, включающее световую и звуковую сигнализацию, а также самопишущий прибор. Показателем качества контролируемого материала является отсутствие на выходе индикаторного устройства сигналов, приводящих к срабатыванию звуковой или световой сигнализации.

Прибор использован в резинотехнической и других отраслях промышленности, производящих материалы, полуфабрикаты и изделия из неметаллических материалов.

Применение прибора позволяет повысить качество контроля резиновых и других смесей, повысить надежность изделий и конструкций, отработать технологию изготовления диэлектрических изделий.

2.4.5. Контроль давления, усилия, деформации

Радиоволновые методы позволяют осуществить косвенные измерения давлений, усилий и деформаций. Измерение этих параметров может быть использовано для косвенного определения различных физических величин, таких как температура, скорость потока и расход перемещаемых веществ, уровень, количество, плотность и др.

Под воздействием давления, усилия или при деформации контролируемого объекта изменяются характеристики электромагнитных полей в резонаторах и, как результат, их информативные параметры – собственная частота и добротность.

Эти параметры резонаторов могут изменяться под воздействием измеряемой величины при:

изменении размеров полости резонатора из-за деформации ее стенки, изменения положения подвижной части стенки полости, например в виде поршня, и т.п.;

изменении электрофизических параметров ϵ или стенки полости на каком-либо участке;

локальном изменении геометрических или электрофизических параметров ϵ , μ среды внутри полости, вызванном, например, изменением этих параметров у частично введенного в полость пробного тела;

изменении положения пробного тела, хотя бы частично расположенного внутри полости;

изменении геометрических или электрофизических параметров ϵ , μ пробного тела, находящегося вне полости, в поле частично или полностью открытого резонатора.

Отметим, что возможны и волноводные методы измерения давлений, усилий и деформаций, основанные на изменении характеристик распространения электромагнитных волн в волноводах, в том числе и длинных линиях под влиянием перечисленных выше видов воздействий.

Большинство известных измерителей построены на основе ВЧ- и СВЧ-резонаторов, у которых изменяются резонансные частоты, несущие полезную информацию, и размеры полости при приложении внешнего воздействия.

Один из приборов, СВЧ-манометр, построен на основе цилиндрического объемного резонатора с колебаниями типа H_{011} резонирующего на частоте 8,65 ГГц. Он предназначен для измерения давлений, больших 13,3 Па, при высокой температуре, когда невозможно прямое использование ртутного или масляного манометра. Одна из торцовых стенок резонатора выполнена в виде плоской диафрагмы из отожженной стали толщиной $\sim 0,1$ мм.

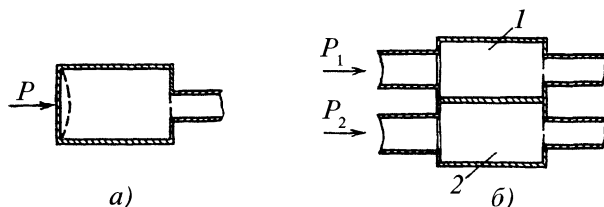


Рис. 2.39. Чувствительные элементы датчиков давления с тонкой диафрагмой (а) и для двухканального датчика (б)

Диафрагма припаяна к холоднокатаному стальному контейнеру.

Диафрагма является термостойкой при температурах вплоть до 450°C и выдерживает разность давлений в $0,1\text{ МПа}$. В процессе измерения на диафрагму и, следовательно, размеры полости резонатора оказывает воздействие внешнее контролируемое давление и, с противоположной стороны, давление в полости резонатора, создаваемое с помощью вспомогательной вакуумной системы, содержащей механический насос и жидкостный манометр. При выравнивании этих давлений резонансная частота резонатора имеет свое номинальное значение, и таким образом достижение этого значения позволяет с помощью жидкостного манометра косвенно, без непосредственного на него воздействия, определить контролируемое давление. Чувствительность такого прибора составляет 18 кГц на разность давлений в 1 Па .

Для применения в ядерных реакторах-размножителях разработан резонансный СВЧ-измеритель давления, построенный по тому же принципу и имеющий гибкую торцовую стенку полости цилиндрического резонатора. Он позволяет определять давление в жидкометаллическом веществе (например, жидком натрии), используемом в качестве теплоносителя и позволяющем обеспечить эффективное охлаждение реактора.

В датчике давления длина l полости изменяется под влиянием давления, воз-

действующего на тонкую диафрагму, изготовленную из коррозионно-стойкой стали и служащую одной из торцовых стенок цилиндрического резонатора (рис. 2.39, а).

Поскольку резонансная частота полости зависит не только от давления, но и от температуры окружающей датчик среды, для исключения этого влияния измерительную аппаратуру строят по двухканальной схеме. В первоначальном варианте датчик содержал два идентичных объемных резонатора с чувствительными к давлению диафрагмами – измерительный 1 и опорный 2, на которые подавались соответственно измеряемое p_1 и известное статические p_2 давления (рис. 2.39, б). Оба резонатора были изготовлены из меди и, соприкасаясь друг с другом по боковой стенке, находились в одинаковых температурных условиях. Резонаторы были заключены в цилиндр из коррозионно-стойкой стали длиной $1,9\text{ см}$ и диаметром $3,3\text{ см}$: чувствительная к давлению торцовая стенка каждого резонатора (диафрагма из коррозионно-стойкой стали) представляла собой диск очень малой толщины ($0,15\text{ мм}$). В обоих резонаторах возбуждались колебания типа H_{012} на частоте $35,8\text{ ГГц}$; добротность резонаторов составляла около 5100 . Выходным сигналом датчика являлась разность резонансных частот данных резонаторов, инвариантная к температуре окружающей среды.

Внутри реактора находились резонаторы, полностью или только своей диафрагмой погруженные в жидкий металл, а

также два металлических волновода, каждый из которых служил для возбуждения электромагнитных колебаний в резонаторах, их съема и передачи на вторичную аппаратуру, которая располагалась вне реактора.

Как показали эксперименты, выходная характеристика такого двухканального датчика близка к линейной в диапазоне температур 40 ... 650 °С и для давлений до 10^5 Па, а чувствительность изменялась от 73,5 Гц/Па при 40 °С до 120 Гц/Па при 650 °С соответственно. Для резких изменений давления постоянная времени составила менее 7,5 мс.

Измерения температуры и давления во многих контролируемых областях можно выполнить, помещая резонатор в каждую область вдоль общего волновода. Эта методика требует применения только одного широкодиапазонного СВЧ-генератора частотно-модулированных колебаний.

Отметим, что в качестве "рабочих" могут быть использованы колебания вырожденных типов, которые имеют одну и ту же начальную резонансную частоту, но разные картины распределений электрического и магнитного полей внутри полости резонатора. Это позволяет минимизировать требуемый диапазон девиации частоты СВЧ-генератора, возбуждающего в резонаторе колебания при заданном диапазоне изменения измеряемых параметров (давления и температуры).

В известных конструкциях СВЧ-датчиков давления применяют также резонаторы с перемещаемыми стенками в виде сильфона (рис. 2.40, а), а также подвижного поршня (рис. 2.40, б).

Примером реализации датчика, соответствующего схеме получения первичной информации с изменением параметров пробного тела в полости резонатора может служить радиоволновый датчик биаксиальных деформаций, предназначенный, в частности, для испытаний топливных элементов ядерных реакторов. Датчик вы-

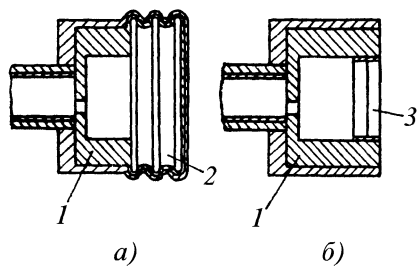


Рис. 2.40. Резонаторы с перемещаемыми стенками в виде сильфона (а) и подвижного поршня (б):

1 – резонатор; 2 – сильфон; 3 – поршень

полнен на основе коаксиального резонатора 3, у которого внутренним проводником 4 является вводимый в полость резонатора испытываемый образец материала, внешняя поверхность которого должна быть электропроводной, жестко соединенный с подвижной стенкой 2 полости резонатора (рис. 2.41). Изменения размеров внутреннего проводника 4 приводят к изменению размеров полости резонатора и, следовательно, к изменению его резонансных частот электромагнитных колебаний. Резонатор возбуждается на колебаниях двух типов E_{110} и H_{011} , первый из которых характеризуется зависимостью соответствующей ему резонансной частоты от диаметра резонатора, т.е. диаметра контролируемого образца, а второй – как от диаметра, так и от длины резонатора (образца). Возбуждение резонатора и съём колебаний осуществляются через торцовую щель (щели) в волноводе 5. Следовательно, возможно измерение деформаций образца по продольной оси и по радиусу (т.е. биаксиальных деформаций). Испытываемый образец выполнен полым, и в его полость подается по трубопроводу 1 газ под давлением, вызывая деформации образца. Радиальные деформации образца вызывают изменение резонансных частот колебаний обоих типов E_{110} и H_{011} , в то время как осевые деформации – только изменение резонансной частоты колебаний типа H_{011} . Изменение длины образца

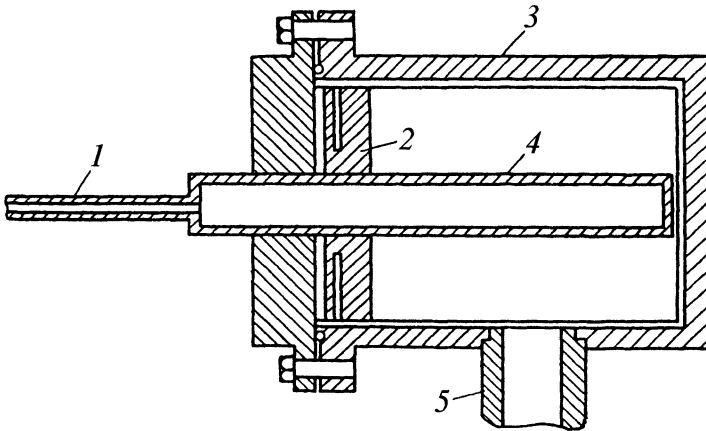


Рис. 2.41. К измерению биаксиальных деформаций

соответствовало изменению положения подвижной стенки 2 полости резонатора, а также ее продольных размеров. Возбуждение резонатора на колебаниях типов E_{110} и H_{011} может производиться одновременно как на одной и той же частоте генератора, так и на разных частотах; в последнем случае необходимо осуществлять девиацию частоты генератора в соответствующем каждому типу колебаний диапазоне изменения частоты.

Для измерения деформаций, а также перемещений, вибраций объектов могут быть применены датчики на основе замедляющих структур. Например, деформация

контролируемых объектов приводит к изменению расстояния между контролируемыми точками, с которыми жестко связаны металлические 3 и 4 и диэлектрическая 5 пластины (рис. 2.42). На пластину 5 нанесено электропроводное покрытие в виде двух штыревых гребенок 1 и 2, установленных "штырь против штыря" на одной поверхности, соответствующих по количеству штырям в гребенках 1, 2 и установленных против этих штырей параллельно им. Толщина диэлектрической пластины 5 равна ширине штырей или меньше. В штыревых гребенках возбуждается электромагнитная волна, отражающаяся от их концов, т.е. такую систему можно рассматривать как резонатор. В такой системе практически все электрическое поле волны сосредоточено в пластине 5, между штырями гребенок 1, 2 и расположенными на второй поверхности пластинами. С изменением расстояния между пластинами 3 и 5, вызываемым деформацией, изменяются эффективная индуктивность резонатора и, следовательно, его резонансная частота. Пластина 4 предотвращает влияние сторонних электропроводных объектов на резонансную частоту. На ее значение не влияет изменение диэлектрической проницаемости окружающей среды.

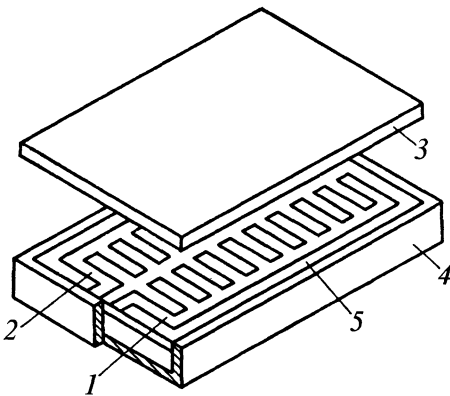


Рис. 2.42. Чувствительный элемент датчика деформации на основе замедляющей структуры

2.4.6. Резонансные СВЧ-методы неразрушающего контроля

В настоящее время широко внедряются конструкционные диэлектрические материалы, в том числе – высокопрочные стекловолоконистые пластики, полимерные пленки и др. Для них характерно отсутствие способности к "самозалечиванию" микродефектов, чем главным образом объясняется практическое снижение их возможных прочностных характеристик. Микродефектами определяются также прочностные и другие характеристики монокристаллов, влияющие на эксплуатационные свойства твердотельных электронных приборов. Возникли принципиально новые требования к размерам обнаруживаемых дефектов, удовлетворить которые путем имевшихся ранее технических решений оказалось невозможным.

В резонансных радиодетектоскопах сочетаются методы радиодетектоскопии для получения пространственной характеристики дефекта (положение в контролируемом изделии, геометрические размеры и форма) с методами радиоспектроскопии для получения информации о свойствах дефектов. Методы радиоспектроскопии основаны на использовании резонансных эффектов максимального поглощения энергии падающего электромагнитного излучения на определенных критических частотах и в ряде случаев – в присутствии внешнего магнитного поля. Основными резонансными эффектами являются: ядерный магнитный (ЯМР), ядерный квадрупольный (ЯКР), электронный парамагнитный (ЭПР), ферромагнитный, антиферромагнитный резонанс и эффект динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера).

Возможности выявления дефектов при резонансных методах в полупроводниках, ферритах и диэлектриках определяются потенциальной и реальной чувствительностью. Потенциальную чувствительность удобно характеризовать объемом минимальной обнаруживаемой сферической областью дефекта V_{min} .

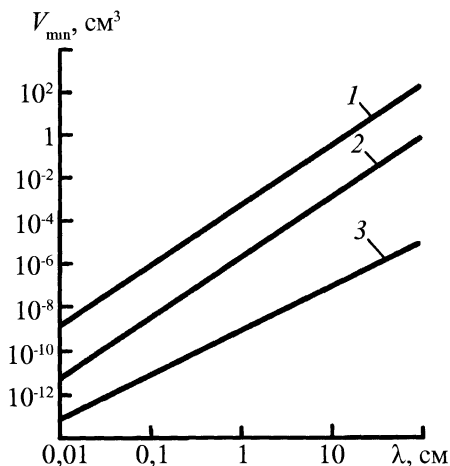


Рис. 2.43. Потенциальная чувствительность квазиоптических (1), голографических (2) и радиоспектроскопических (3) методов в зависимости от длины волны λ

В зависимости от длины волны λ эта область при квазиоптических, голографических и радиоспектроскопических методах приведена на рис. 2.43. Для последних она определяется соотношением $V_{min} = 10^{-9}\lambda$.

Поскольку для выделения сигнала, несущего информацию о дефекте при резонансных методах радиодетектоскопии (РМРД), нет принципиальной необходимости в пространственной локализации излучения при обнаружении дефектов (если не ставится задача определения их координат и геометрии), то РМРД позволяют выявлять существенно меньшие дефекты, чем другие радиометоды. Реальная чувствительность РМРД определяется флуктуационными шумами аппаратуры и методами обработки сигналов. Если предельную реальную чувствительность РМРД выразить числом минимально регистрируемых спинов N_{min} , то выражение для минимального диаметра регистрируемого дефекта d_{min} будет иметь вид

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{6N_{min}}{\pi L}}$$

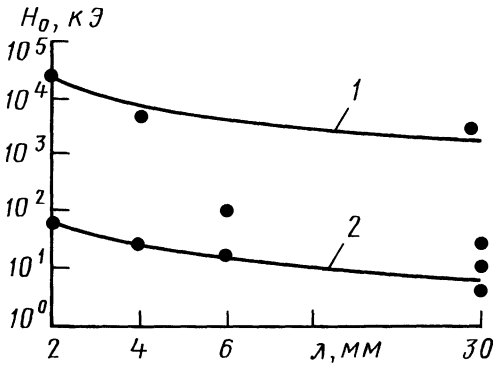


Рис. 2.44. Зависимость требуемой напряженности магнитного поля H_0 от длины волны λ для ядерного магнитного (1) и электронного парамагнитного (2) резонансов (точками отмечены данные серийных приборов)

где L – число Лоршмита. Серийно выпускаемый спектрометр IES3BQ имеет на волне $\lambda = 8$ мм чувствительность $N_{\min} = 10^{10}$.

Реализация потенциальных возможностей РМРД связана с преодолением ряда трудностей. Во-первых, в большинстве случаев чувствительность РМРД ограничивается потенциальной чувствительностью, т.е. используемой длиной волны. Поэтому повышение чувствительности требует использования волн миллиметрового диапазона со всеми вытекающими последствиями: трудностью генерации и приема излучения с большим затуханием в веществах. Во-вторых, для использования в РМРД ЯМР, ЭПР и других эффектов требуется воздействие на образец постоянных (медленноменяющихся) магнитных полей значительной напряженности H_0 . Требуемая напряженность магнитного поля может быть найдена исходя из соотношения, определяющего энергетические условия резонанса: для ЯМР $h\nu = g\mu_0\mu_n H_0$, для ЭПР

$$h\nu = g\beta H_0,$$

где ν – частота; h – постоянная Планка; g – фактор спектроскопического расщепления; μ_0 – ядерный магнетон; μ_n – магнитная постоянная; β – магнетон Бора. Зависимость $H_0(\lambda)$ приведена на рис. 2.44. Из

нее видно, что требуемая напряженность магнитного поля составляет сотни и тысячи килоэрстед и может быть достигнута при использовании сверхпроводящих или импульсных магнитов.

В-третьих, при РМРД требуется значительный энергетический потенциал. С уменьшением длины волны λ растет потенциальная чувствительность РМРД, но в связи с ростом потерь в материале увеличивается и требуемый энергетический потенциал M (децибелл). Он определяется отношением требуемой выходной мощности $P_{\text{вых}}$ источника СВЧ-излучения и минимальной регистрируемой входной мощностью $P_{\text{вх. min}}$ сигнала в приемнике, т.е.

$$M = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх. min}}},$$

где $P_{\text{вх. min}} = VK_{\text{ш}}^2$; V – постоянная величина; $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника.

Расчеты показывают, что, например, для контроля РМРД заготовок материалов для изделий электронной техники требуется энергетический потенциал $M > 130$ дБ. Приведенная в табл. 2.5 оценка располагаемых энергетических потенциалов свидетельствует о возможности использования различных маломощных источников. Дополнительные трудности связаны с необходимостью обеспечения высоких значений стабильности и однородности магнитного и радиочастотного полей в рабочем пространстве дефектоскопа. Степень преодоления этих трудностей в разработанных приборах приведена в табл. 2.6.

Из изложенного следует, что РМРД присущи следующие преимущества по сравнению с другими радиометодами:

1. При РМРД возможно использование волн сравнительно большой длины, обладающих меньшим затуханием в материале, поэтому возможно использование резонансных дефектоскопов для контроля больших объемов материала. Например, резонансные длины волн ЯМР лежат в пределах 5 ... 100 м при магнитных полях

700 ... 1400 Э, резонансные частоты ЯКР большинства твердых тел лежат в пределах 0,5 ... 300 м, а ЭПР – в сантиметровом диапазоне.

2. Минимальный регистрируемый объем дефекта не зависит от формы диаграммы направленности и распределения излучения в среде, а определяется только тем минимумом материала, при котором проявляется соответствующий резонансный эффект, и пороговой чувствительностью приемного устройства.

Все РМРД позволяют прогнозировать прочностные, физико-химические, радиационные, электрофизические и другие свойства соответствующих материалов по процессам образования и роста структурных и других неоднородностей в микрообъемах. Вместе с тем для каждого вида резонансных эффектов существуют области наиболее эффективного использования. Для ЭПР – исследование и оценка поведения одной микропримеси в присутствии другой, что позволяет контролировать чистоту исходных материалов и прогнозировать работоспособность изделий из них в экстремальных условиях. Для ЯКР – контроль наличия областей, имеющих некубическую симметрию и располагающихся вблизи скопления дислокаций и

механических деформаций, что позволяет прогнозировать механическую прочность. Для ФМР – контроль нарушения доменной структуры и появления микропримесей Fe, Ni, Co, что позволяет оценивать качество ферритовых изделий.

При использовании резонансных частот миллиметрового диапазона РМРД приобретают следующие принципиально новые возможности по сравнению с длинноволновыми приборами:

1. Спектроскоп миллиметрового диапазона позволит производить изотопический анализ с высоким разрешением большого числа молекул. Частоты вращательных спектров молекул в этом диапазоне обратно пропорциональны моментам инерции молекул, поэтому резонансные частоты меняются по тем же законам, что и изотопические массы молекул. Существенным преимуществом радиоспектроскопического метода определения изотопических масс по сравнению с масс-спектральным является более высокая точность, обусловленная отсутствием фона от других ядер или радикалов с одинаковой массой. Практически удается измерить отношение атомных масс в пределах 0,1 ... 0,005 с точностью 1 %.

2.5. Энергетический потенциал резонансных радиодефектоскопов с различными источниками*

Источник	Коэффициент шума $K_{ш}$	Чувствительность $P_{вх}$, Вт	Генерируемая мощность $P_{вых}$, Вт	Энергетический потенциал M , дБ
Отражательный малошумящий клистрон	10^3	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-2}$	137
Малошумящая ЛБВ	10	10^{-15}	$5 \cdot 10^{-2}$	137
Параметрический усилитель	3	10^{-16}	$1 \cdot 10^{-2}$	140
Квантовый усилитель	1,5	$3 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-3}$	143

*Указаны обобщенные характеристики для приборов, перечисленных в табл. 2.6.

2.6. Степень реализации предельных характеристик РМРД в серийных спектрометрах

Предельная характеристика		Достигнутый уровень			
Наименование	Значение	IES3BQ	АФИР	Philips	ОКБ ДФТИ
Рабочий диапазон волн, мм	1 ... 2	8	1 ... 3	4	2
Чувствительность (число спинов)	10^{10}	10^{10}	–	–	10^{10}
Энергетический потенциал, дБ	140	–	–	100	50
Магнитное поле (непрерывное/ импульсное) кЭ	100	–	60/170	–	60
Стабильность:					
$\Delta H/H$	10^{-5}	10^{-5}	–	10^{-5}	10^{-5}
$\Delta f/f$	10^{-10}	10^{-10}	–	10^{-10}	10^{-10}

2. Имеется возможность сочетать обнаружение микронеоднородностей с детальным анализом их химического состава. Расчеты показывают, что при имеющейся в настоящее время стабильности аппаратуры диапазона 0,5 ... 10 мм можно определять до 200000 положений спектральных линий и идентифицировать более 60000 веществ.

2.5. КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (СМЕЩЕНИЯ, УРОВНЯ, СКОРОСТИ, УСКОРЕНИЯ, ВИБРАЦИИ)

Радиоволновые методы значительно расширяют область измерения механических величин и позволяют определять перемещение, вибрации, скорость и другие динамические характеристики объектов. Решающий фактор точности измерений – длина волны λ ; точность тем выше, чем короче λ . С этой точки зрения является очевидным преимущество применения СВЧ-радиоволн.

Другие характерные преимущества следующие:

- бесконтактность контроля, в результате чего датчик не нагружен и не нарушает состояние поверхности изучаемого или контролируемого объекта;
- весьма мала инерционность системы считывания;

- возможно проведение непрерывных измерений;

- результирующий сигнал пропорционален измеряемой величине или ее изменениям;

- сигналы на выходе системы не требуют дополнительного преобразования;

- систему легко калибровать и автоматизировать.

В практике контроля указанных выше динамических характеристик находят применение, как правило, мостовые, резонансные методы и основанные на эффекте Доплера.

Мостовые методы используют двойной волноводный тройник. Диапазон минимально обнаруживаемых перемещений составляет 0,1 ... 0,01 мкм. Для измерений небольших механических смещений неподвижных объектов порог чувствительности приблизительно равен 0,01 мкм, а движущихся – около 0,1 мкм. Для объектов, расположенных на расстоянии более 0,5 м, преобразователь снабжается, как правило, эллиптической антенной диаметром не менее 280 ... 300 мм (при использовании восьмимиллиметрового диапазона радиоволн). Если антенна обладает хорошей направленностью либо фокусирующими свойствами, то прибор регистрирует

практически только изменение фазы отраженного сигнала.

СВЧ-преобразователи на мостовых схемах широко используют для определения очень малых изменений размеров различных деталей, проверки допусков прецизионных деталей в условиях рабочих вибраций, при балансировке вращающихся объектов, измерений скорости перемещения отражающей радиоволны границы раздела. Так, при измерении скорости для некоторого положения границы раздела с помощью аттенюатора и фазовращателя (КЗ-поршня) добиваются баланса моста – отсутствия сигнала в детекторной секции. В процессе изменения положения границы СВЧ-мост разбалансируется. Скорость изменения энергии, поступающей к детектору, пропорциональна скорости перемещения отражающей границы. При смещении границы от первоначального сбалансированного положения на $\lambda/2$ тройник снова будет сбалансирован. Для того чтобы с помощью описываемого устройства можно было измерить скорость перемещения в абсолютных единицах, нужно знать длину волны при распространении СВЧ-радиоволн в среде.

Резонансные методы более чувствительны к перемещениям отражающих поверхностей. Порог чувствительности находится в диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-6}$ нм. При выборе рабочей резонансной частоты, например, $f_0 = 7$ ГГц, изменение частоты на 1 Гц будет соответствовать перемещению границы на 10^{-3} нм. На рис. 2.45 представлена упрощенная схема преобразователя одного из устройств, реализующих резонансный метод.

Реализация резонансного метода с обеспечением высокой чувствительности к перемещениям требует высокой стабильности частоты СВЧ-генераторов и основного элемента преобразователя – резонатора.

При определенным образом подобранных параметрах СВЧ-преобразователя

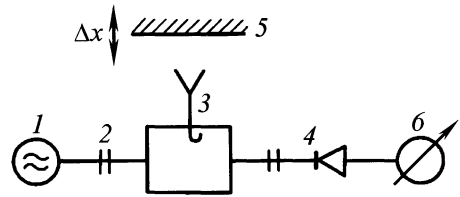


Рис. 2.45. Схема преобразователя на резонансном методе:

- 1 – СВЧ-генератор; 2 – резонатор;
- 3 – элемент связи резонатора с антенной;
- 4 – детекторная секция; 5 – участок поверхности объекта контроля; 6 – индикатор

отпадает необходимость в калибровке индикатора: числовые значения Δf будут соответствовать расстоянию Δx .

Дистанционный контроль скорости движущихся объектов чаще всего производится с применением эффекта Доплера.

Известно, что частота принимаемого сигнала $f_{пр}$, отраженного от объекта, движущегося со скоростью v , будет отличаться от частоты f_0 излучаемого сигнала на величину $F_0 = 2v/c$ (c – скорость света). Поэтому в зависимости от направления движения объекта $f_{пр} = f_0(1 \pm 2v/c)$.

При использовании $\lambda = 3$ см для $v = 540$ км/ч F_0 составит 10 кГц, а для $v = 1$ м/с (пешеход) – 66 Гц.

Учитывая на практике сложный характер отражения сигнала объектом, как правило, применяют волны круговой поляризации и смесительный режим работы приемного тракта. Этим условиям в совокупности с простотой реализации отвечают схемы СВЧ-преобразователей на основе волноводного турникетного соединения. Точность измерения скорости составляет 1 ... 1,5 %.

Схемы с использованием волноводного турникетного соединения широко применяют для контроля вибраций, позволяя с высокой точностью контролировать дистанционно как амплитуду вибраций, так и частоту. Диапазон контролируемых частот распространяется от близких к нулевым значениям до нескольких

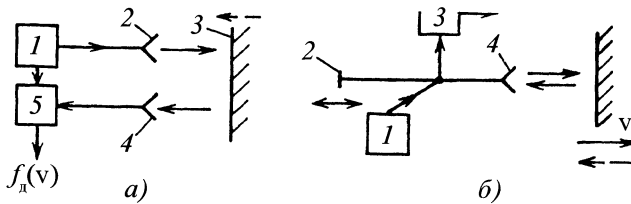


Рис. 2.46. Схемы простейших доплеровских измерителей с двумя (а) и с одной антенной (б)

сотен мегагерц, ограничиваясь инерционностью индикаторных систем. Диапазон контролируемых амплитуд зависит от выбранной рабочей длины волны и практически составляет единицы миллиметров.

На рис. 2.46, а приведена схема простейшего доплеровского измерителя скорости с передающей и приемной антеннами. Непрерывные электромагнитные колебания с СВЧ-генератора 1 поступают на передающую антенну 2. Излучаемые ею по нормали к движущемуся со скоростью v отражателю 3 волны с частотой f_0 после отражения от него поступают на приемную антенну 4, имея частоту $f_0 \pm f_d$ (верхний знак соответствует приближению отражателя, нижний – удалению).

Далее принятые сигналы подаются на смеситель 5, куда приходят также колебания частоты f_0 с генератора. Частота f_d колебаний на выходе смесителя пропорциональна скорости v отражателя.

В варианте, изображенном на рис. 2.46, б и содержащем двойной Т-образный мост, имеется одна приемно-передающая антенна 4. Здесь также обозначены: 1 – СВЧ-генератор; 2 – короткозамыкающий поршень; 3 – смеситель.

Данные схемы могут быть применены для измерения линейной скорости различных технологических объектов, например скорости движения металлической полосы на прокатном стане, для контроля заполнения технологических емкостей

различными жидкостями и контроля уровня жидкого металла при разливке в изложницы.

Доплеровский сдвиг частоты зондирующей волны имеет место при отражении от движущейся поверхности жидкого металла. Измерительное устройство работает на частоте 10,525 ГГц. При скорости разливки около 100 мм/мин доплеровский сдвиг частоты составляет 0,3 Гц. Выходное устройство измерителя регистрирует среднюю скорость разливки за период. Среднеквадратическая погрешность измерения доплеровской частоты составляет $\sim 0,0003$ Гц, что соответствует скорости разливки 0,23 мм/мин.

Опыт эксплуатации системы автоматического управления скоростью разливки показал, что ее использование резко сокращает появление трещин в слитках и заготовках.

Другой подход к измерению скорости заключается в реализации амплитудно-фазового (интерференционного) метода. Между приемно-передающей антенной измерителя и контролируемым объектом (проводником или диэлектриком) в результате интерференции зондирующих и отраженных волн устанавливается в пространстве режим стоячей волны, при котором минимумы напряженности электрического поля следуют через $\lambda/2$. Число минимумов (или максимумов), зависящее от расстояния до объекта, при его движе-

частота соответствует частоте вибраций контролируемого объекта.

Типичными параметрами радиоволновых виброметров являются: диапазон измеряемых частот колебаний 50 ... 20000 Гц, амплитуда смещения поверхности объекта 0,1 ... 2мм, расстояние до объекта ≤ 10 м при рабочей частоте порядка 35 ГГц. Эллиптическая антенна виброметра обычно снабжается оптическим окуляром для наведения виброметра на поверхность контролируемого объекта. Схема СВЧ-виброметра приведена на рис. 2.47.

2.6. СВЧ-ТОМОГРАФИЯ

Для томографических систем линейного взаимодействия эффективны алгоритмы, основанные на инверсном преобразовании Радона многоакурсных результатов регистрации. Такие алгоритмы хорошо разработаны в медицинской рентгеновской реконструктивной вычислительной томографии.

Однако при взаимодействии радиоволн СВЧ-диапазона вследствие дифракционных искажений при прохождении волн через объект методы преобразований, разработанные для целей медицинской томографии, утрачивают свою эффективность. С разной точностью приближений эти проблемы решают методами эйконала и в приближении М. Борна и С.М. Рытова.

Таким образом, задачи рентгеновской визуализации обычно сводятся к нахождению решения системы линейных уравнений вида $[c] [d] = [P]$, где $[c]$ – матрица коэффициентов, $[d]$ – вектор неизвестных плотностей, взятых в точках некоторой координатной сетки, а в $[P]$ содержатся значения линейных интегралов, измеренных по отдельным траекториям. При визуализации же в радиоволнах результирующая система уравнений будет иметь вид $[c(d)] [d] = [P]$, где матрица коэффициентов $[c(d)]$ зависит от искомой плотности d и, следовательно, задача становится

нелинейной. Совершенно очевидно, что разработанный для рентгеновского излучения алгоритм непосредственно использовать здесь нельзя, поскольку траектории, по которым измеряются нелинейные интегралы, неизвестны и, следовательно, требуется нелинейная процедура восстановления. М. Тасто и Г. Шомберг предложили простой метод обобщения хорошо известного алгебраического метода реконструкции на нелинейный случай. Вначале задают некий исходный профиль проводимости (диэлектрической проницаемости, плотности), а затем методом конечных разностей рассчитывают потенциал (напряженность электрического поля), подчиняющийся заданной системе граничных условий. Если для реконструкции изображения используют итеративную процедуру, то вычисление может производиться после каждой итерации, а траектории должны соответствующим образом изменяться.

Очередной шаг в развитии методики восстановления радиоизображения в СВЧ-диапазоне заключается в следующем. Получают двумерное изображение сечения в дискретизованной форме, используя алгоритмы линейного восстановления с помощью автоматического сканирующего рентгеновского томографа. Это изображение используется для указания размеров и относительного положения неоднородностей в области данного сечения объекта. Затем составляют уравнения электромагнитного поля, учитывающие размеры и формы неоднородностей, и решают их численно с помощью метода моментов. Процедура решения состоит в разбиении сечения на небольшие элементы и вычислении электрического поля в центре каждого элемента с помощью метода моментов. Во всех случаях максимальный размер элемента находится между $0,1 \lambda \sqrt{\epsilon}$ и $0,2 \lambda \sqrt{\epsilon}$, где λ – длина волны в свободном пространстве, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость элемента. Затем

передатчик перемещают по окружности объекта контроля и вычисления производят при различных положениях приемника. При повышении частоты передатчика повышается разрешающая способность и, следовательно, можно получить более точную информацию о распределении диэлектрической проницаемости. Следует к этому добавить, что можно получить более высокую чувствительность, если восстановление будет основываться не на амплитуде, а на фазе сигнала.

Еще одним направлением в разработке томографических систем на СВЧ является применение доплеровского метода. Пусть имеется СВЧ-антенна, которая используется для облучения вращающегося объекта с некоторой заданной мощностью излучения на одной частоте. Эта же антенна используется и для приема отраженных сигналов. Исследуемый объект поворачивается на угол 360° , при этом при каждом угле наблюдения θ записываются амплитуда и фаза сигналов.

Необходимо заметить, что можно было бы записывать только амплитуду сигналов и все же получить томографическое изображение. Поскольку исследуемый объект поворачивается относительно неподвижной антенны, центры рассеяния энергии облучения внутри объекта дают отраженные сигналы, сдвинутые по частоте относительно исходной частоты на величину, зависящую от скорости перемещения отдельных отражателей (неоднородностей). Если объект вращается с постоянной угловой скоростью, то центры рассеяния, лежащие на линии постоянной поперечной дальности, будут иметь одинаковую составляющую скорости в направлении на антенну. Таким образом, в данный момент времени все эти центры рассеяния будут отражать сигнал и все отраженные ими сигналы будут иметь один и тот же доплеровский сдвиг частоты. Измеряя выходной сигнал приемника на некоторой частоте, получим сумму (линейный интеграл) рассеянного излуче-

ния на данной поперечной дальности, соответствующей этой частоте. Амплитуда отраженных сигналов на других частотах дает линейные интегралы для рассеивателей на других поперечных дальностях. График зависимости мгновенной амплитуды от частоты можно интерпретировать как томографическую проекцию. Через некоторое время исследуемый объект повернется в новое положение и будут получены новые проекции и т.д. Иными словами, за полный оборот исследуемого тела будет получено много отдельных проекций. Алгоритм томографической реконструкции по данным, получаемым из этих проекций, дает изображение распределения центров рассеяния в облучаемом объекте. При анализе можно прийти к различным способам обработки данных, в которых используют фазу и амплитуду отраженных сигналов, но не их спектры.

С помощью такого подхода можно получать томографические изображения с передаточной функцией точки в 2,5 раза острее функции, соответствующей обычному рэлеевскому разрешению.

Один из этапов восстановления изображения по когерентной доплеровской томограмме состоит в вычислении двумерного преобразования Фурье. Такое восстановление возникает вполне естественно не только при когерентной доплеровской томографии, но и при решении других задач визуализации томографических изображений.

Главное преимущество когерентной доплеровской томографии в том, что она обладает высоким пространственным разрешением, которое можно получить при непрерывном излучении, не прибегая к использованию широкополосных сигналов. К недостаткам относится наличие больших боковых лепестков у передаточной функции точки, которые ограничивают динамический диапазон и ухудшают разрешение в случае, когда точки объекта не могут наблюдаться под большими углами.

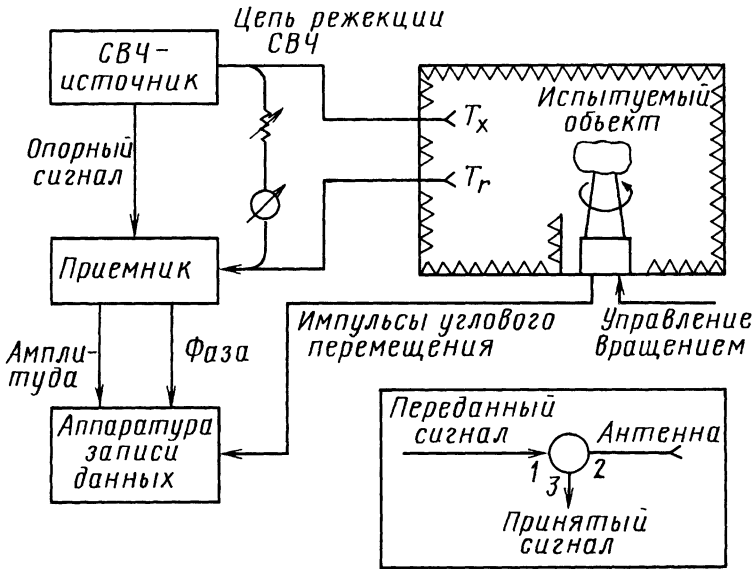


Рис. 2.48. СВЧ-томограф на отражение-рассеяние с механическим сканированием

В настоящее время наибольший прогресс в обращении волнового уравнения, необходимого для количественной оценки такой характеристики, как диэлектрическая проницаемость и проводимость исследуемого объекта, достигнут в реконструктивной томографии при работе в трансмиссионном режиме. Примером такого подхода являются методы СВЧ-томографии, основанные на принципах СВЧ-радиовидения и многочастотной радиолокации.

В СВЧ-томографии могут использоваться при сборе данных механические и электрические системы сканирования. Первые системы (механические), в свою очередь, могут быть с круговым вращением исследуемого объекта или его линейным перемещением. Электрические системы основаны либо на электрическом сканировании электромагнитного луча, либо на многоэлементном сборе полезной информации.

На рис. 2.48 показана структурная схема типичной системы, предназначен-

ной для сбора требуемых данных. Измерения выполняются в безэховой камере, стенки которой изнутри оклеены поглощающим СВЧ-излучение материалом для подавления паразитных отражений, что позволяет как бы смоделировать условия свободного пространства.

Объект устанавливается на вертикальной колонке, изготовленной из пенополистирола – материала, который относительно прозрачен для падающего СВЧ-излучения. Колонка прикреплена к поворотному столу, снабженному устройством для считывания углового положения. Непрерывный сигнал излучается антенной с достаточно широким лучом, что необходимо для равномерного облучения всего объекта, а отраженный сигнал принимается аналогичной антенной, расположенной непосредственно рядом с передающей. Возможен также метод с использованием только одной антенны, которая с помощью циркулятора подключается к передатчику и приемнику.

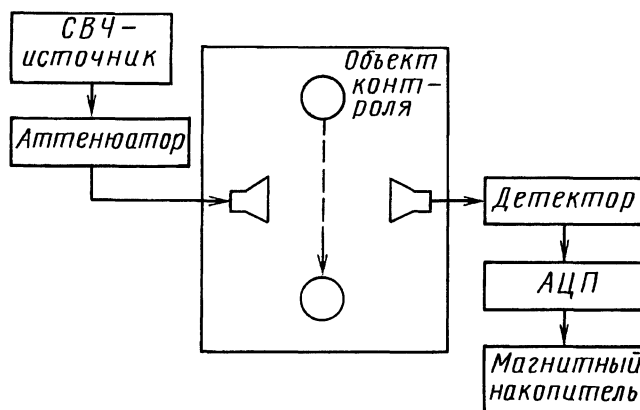


Рис. 2.49. СВЧ-томограф на прохождение с механическим сканированием

Объект медленно вращается, амплитуда и фаза принимаемых сигналов измеряются по командам устройства считывания углового положения. Если для полного поворота объекта необходимо N угловых приращений, измеренные данные будут состоять из N пар чисел, каждая из которых характеризует амплитуду и фазу принятого сигнала. Эти числа в цифровом формате записывают на магнитную ленту для последующего декодирования и обработки. Каждая пара чисел описывает некоторый фазор, который можно эквивалентным образом определить, измеряя его синфазную и квадратурную составляющие. В любом случае это измерение дает комплексное число, соответствующее каждому отсчетному угловому интервалу. Для приема сигналов используют стандартный приемник, подобный применяемому для антенных измерений или измерения радиолокационного поперечного сечения целей. Он должен иметь линейный динамический диапазон не менее 62 дБ и обеспечивать разрешение по амплитуде и фазе, равное соответственно 0,1 дБ и $0,1^\circ$. Записанная фаза является мерой фазы принимаемого сигнала относительно излучаемого сигнала. Абсолютная амплитуда записанных сигналов может калиброваться с помощью аналогичных данных,

полученных на каком-либо объекте простой формы с известной отражающей способностью. Информация об изображении является зависимостью амплитуды и фазы сигналов от угла. Это устраняет необходимость выполнения абсолютных измерений и тем самым упрощает процедуру эксперимента.

Так как данные считываются через дискретные угловые интервалы, должен удовлетворяться критерий Найквиста. Это означает, что приращения угла должны быть достаточно малыми, для того чтобы фаза сигналов, отраженных от периферийных точек объекта, изменялась от отсчета к отсчету не более чем на π рад. Фаза сигналов с длиной волны λ , отраженных от точек объекта, расположенных на расстоянии r от оси вращения, будет сдвинута максимум на $4\pi r \sin \Delta\Theta / \lambda$ рад при угловом приращении $\Delta\Theta$. Следовательно, для объекта диаметром D максимальная величина углового приращения будет равна

$$\Delta\Theta = \lambda/2D.$$

Расстояние, на котором производится измерение, выбирается таким образом, чтобы обеспечить выполнение условий в дальней зоне, иными словами, выполнить условия, при которых фронты волн, пада-

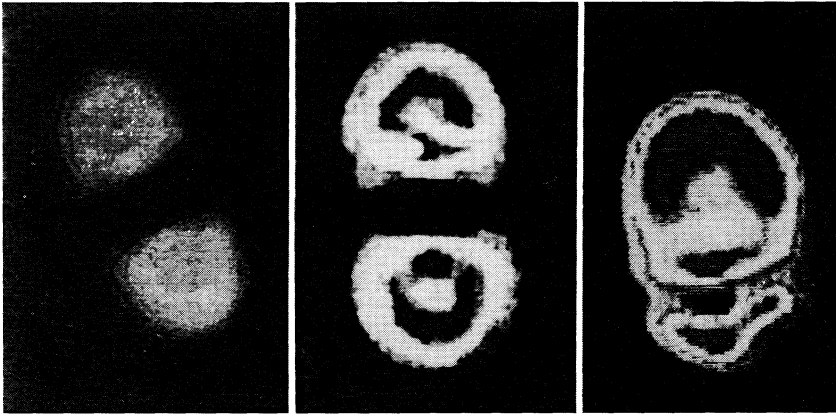


Рис. 2.50. СВЧ-томографические изображения

ющих на объект, будут относительно плоскими.

Линейное перемещение исследуемого объекта использовано в устройстве, блок-схема которого приведена на рис. 2.49. Как видим, в томографическом микроволновом устройстве используется режим прохождения радиоволн СВЧ-диапазона через объект контроля. Система более перспективна в случае контроля материалов с большим затуханием волн выбранного диапазона при условии возможности обеспечения двухстороннего доступа к исследуемому объекту.

На рис. 2.50 представлены СВЧ-томографические изображения поперечных сечений двух диэлектрических труб, наполненных двухкомпонентной жидкостью: водой, поглощающей СВЧ-излучение, и жидкостью со слабым поглощением (для лучшего контраста).

На рис. 2.51 представлен вариант устройства с многоэлементным сбором полезной (рассеянной объектом контроля) информации.

Сбор информации осуществляется 22 000 дипольных антенн. При машинной обработке по сложному алгоритму требуется память объемом около 1 Гбайт.

К томографическим СВЧ-устройствам можно отнести широко используемые на практике георадары для зондиро-

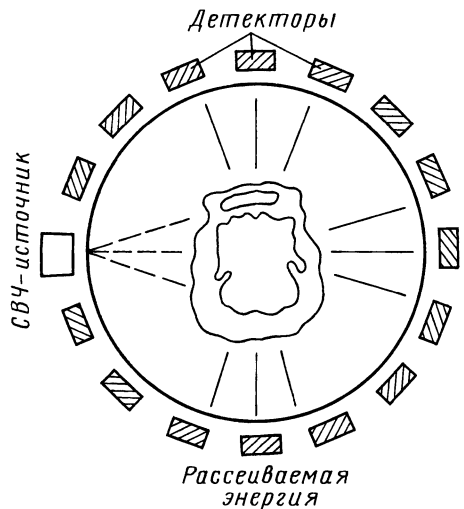


Рис. 2.51. СВЧ-томограф с электрическим сканированием

вания грунтов. Применяемые в последующем программы RADAN позволяют производить анализ глубины залегания неоднородностей, осуществлять масштабирование и привязку к объектам на местности, получать трехмерные изображения на основе серии параллельных профилей.

СВЧ-томография находится еще на начальном этапе своего развития, однако первые опыты обнадеживают, предвещая значимые перспективы.

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ РАДИОВОЛНАМИ СВЧ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При работе с аппаратурой СВЧ необходимо выполнять требования ГОСТ 12.1.006–84 "Электромагнитные поля радиочастот", а также соблюдать "Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот", утвержденные Минздравом СССР.

Облучение в интенсивном поле СВЧ живых тканей приводит к изменению их свойств. Различают две основные по характеру воздействия группы эффектов: связанные с интенсивностью облучения (интегральные эффекты) и резонансные, проявляющиеся в слабых полях на определенных частотах.

Максимальная излучаемая мощность аппаратуры и максимальная плотность излучаемой энергии в зоне присутствия обслуживающего персонала указаны в технических условиях на приборы конкретных типов, причем максимальные значения плотности не должны превышать предельно допустимых значений, установленных нормами.

Электромагнитное излучение в диапазоне частот 300 МГц ... 300 ГГц оценивается поверхностной плотностью потока энергии (ППЭ) излучения и создаваемой им энергетической нагрузкой (ЭН) – суммарным потоком энергии, проходящим через единицу облучаемой поверхности за время действия t и выражаемым произведением ППЭ $\times t$. Нормативное значение ЭН за один рабочий день не превышает 200 мкВт·ч/см², а максимальное значение ППЭ должно быть не более 1000 мкВт/см².

Санитарными нормами установлено, что при ППЭ 1000 мкВт/см² можно работать не более 15 мин, при 100 мкВт/см² –

не более 2 ч, а при 10 мкВт/см² – в течение всего рабочего дня.

В США установленный предельно допустимый уровень облучения радиоволнами на производстве составляет 10 мВт/см², а в Канаде снижен до 1 мВт/см². Поэтому в России и других странах Европы действует самый низкий предельно допустимый уровень – 10 мкВт/см², при котором не только не происходит тепловое воздействие на живой организм, но и воздействие на центральную нервную систему.

В случаях необходимости проведения работ в условиях, отличающихся от установленных нормами, следует пользоваться защитными средствами и материалами. Грамотное их применение – одно из основных требований техники безопасности.

Для защиты рабочего места от повышенной энергетической нагрузки необходимо использовать радиопоглощающие материалы, экраны, рассеиватели. Выбор материала осуществляют в зависимости от интенсивности и частоты излучения. Хорошо зарекомендовали себя радиопоглощающие материалы из резины с повышенным содержанием сажи. Такие экраны в виде листов имеют, к тому же, внешнюю поверхность с периодическими выступами. Размер выступов зависит от частотного диапазона, в котором используют поглощающий материал, и обычно составляет примерно $\lambda/4$. В результате уменьшается отражение от поглотителя, и оно не носит зеркального характера. Часто резиновые листы дополнительно армируют металлической сеткой из хорошо проводящего материала (меди), представляющей сетчатый экран. В этом случае прошедшая энергия не превышает 1 % от падающей. Таким образом, применением

радиопоглощающих материалов снижают энергетическую нагрузку до установленных норм и ниже.

Для защиты локальных участков тела (например, глаз, лица) применяют защитные очки, маски и т.п. Очки выполняют из оптически прозрачных материалов, экранирующих СВЧ-излучение (обычно это тонкопленочные покрытия из хорошо проводящих материалов).

Резонансные эффекты в практике радиоволнового НК не проявляются в связи с ограничением практического применения характерных участков СВЧ-диапазона радиоволн.

3.2. ЗАЩИТА ОТ РАДИОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиопоглощающие материалы являются перспективным средством защиты от СВЧ-излучения.

Принцип работы таких материалов заключается в том, что поглощенная энергия преобразуется в другие виды энергии в самом материале. При этом имеют место явления поглощения, рассеивания и интерференции электромагнитных волн. При поглощении электромагнитной энергии происходит ослабление поля падающей волны, обусловленное переходом энергии поля в тепло.

Такой процесс объясняется прежде всего наличием у поглощающего материала диэлектрических и магнитных потерь. Процесс рассеивания является преобразованием распространяющегося в материале потока электромагнитной энергии определенного направления в потоки различных направлений. Явление интерференции радиоволн (по аналогии с оптической интерференцией) обуславливает отражательную способность поглощающего материала в направлении наибольшего вторичного излучения от его поверхности. Поглощающие материалы можно разделить на два основных типа:

1. Радиопоглощающие покрытия.
2. Радиопоглощающие конструкционные материалы.

И к тем, и к другим материалам предъявляют следующие требования:

- минимальное отражение радиоволн от защищаемой поверхности;
- максимальное поглощение электромагнитных волн;
- широкий диапазон поглощаемой энергии по частоте;
- высокие прочностные характеристики;
- минимальные габариты и масса;
- способность работать в широком интервале положительных и отрицательных температур.

По принципу работы радиопоглощающие материалы можно разделить на два основных типа:

узкодиапазонные – интерференционные;

широкодиапазонные – поглощающие.

В узкодиапазонных интерференционных покрытиях вторичное радиоизлучение гасится вследствие интерференции радиоволн, отразившихся от наружной поверхности покрытия и маскируемой поверхности объекта. В широкодиапазонных поглощающих материалах благодаря определенной их структуре отражения от внешней поверхности материала не происходит, и почти вся энергия электромагнитной волны, входящей в маскирующее покрытие, постепенно затухает и превращается в тепло за счет наведения рассеянных токов, магнитно-гистерезисных или высокочастотных диэлектрических потерь.

В зависимости от электрических и магнитных свойств радиопоглощающие материалы можно разделить на диэлектрические и магнитно-диэлектрические.

Коэффициент отражения

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon/\mu} - 1}{\sqrt{\varepsilon/\mu} + 1}.$$

Очевидно, что коэффициент r будет равен нулю (отражение от покрытия отсутствует) при равенстве диэлектрической

и магнитной проницаемостей $\epsilon = \mu$ материала.

Материал, обладающий такими свойствами, должен быть пористым (например, каучук или пенополистирол). Однако и в этом случае трудно добиться для входного слоя выполнения условия $\epsilon = \mu$.

Эффективность действия покрытия улучшается, если его коэффициент поглощения постепенно увеличивается от наружной поверхности покрытия к защищаемой. Для этой цели применяют многослойные диэлектрические радиопоглощающие материалы ($\mu_{\text{отн}} = 1$), у которых проницаемость ϵ возрастает от наружной поверхности вглубь покрытия.

Если в поглощающих защитных покрытиях большая часть падающей на них энергии превращается в тепло, прежде чем электромагнитные волны достигнут отражающей поверхности защищаемого объекта, то в интерференционных (узкодиапазонных) покрытиях отсутствие отражения от маскируемого объекта достигается благодаря интерференции двух волн: отразившейся от наружной поверхности покрытия и от поверхности, на которую оно нанесено.

Простейшее интерференционное покрытие представляет собой резонансный поглотитель, состоящий из однородного слоя диэлектрика, нанесенного на металлическую поверхность. Толщина d слоя

диэлектрика, его диэлектрическая постоянная ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ выбраны так, что коэффициент отражения падающих электромагнитных волн равен нулю.

За рубежом интерференционные защитные покрытия изготавливают из различных пластмасс или каучука, наполненных порошком графита или карбонильного железа. Достоинством таких покрытий являются их значительная механическая прочность, гибкость, сравнительно малая толщина и небольшая масса. Основным недостатком в том, что поглощение происходит в узкой полосе частот. Это связано с основным условием получения интерференционного неотражающего покрытия: толщина его зависит от длины волны передатчика, а также от проницаемостей ϵ и μ самого материала:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

Чтобы выполнить это условие, необходимо точно подобрать величины ϵ , μ и толщину покрытия. Для коротких волн при больших диэлектрических и магнитных потерях в веществе покрытия могут быть достаточно тонкими. Интерференционные материалы хорошо работают лишь при нормальном падении радиоволн на их поверхность. При других углах падения коэффициент отражения покрытия резко возрастает.

3.1. Характеристики узкодиапазонных защитных покрытий

Марка (Англия)	Толщина, мм	Диапазон длин волн, см	Ширина диапазона, %	Масса, кг/м ²	Отражатель
MX1	2	3 ... 3,4	10	7	Медь
MX3	2	—	10	9	Ткань
MS1	4	—	24	17	Медь
MS3	4	9,1 ... 10,5	24	17	Ткань

3.2. Характеристики широкодиапазонных защитных покрытий

Марка (США)	Нижняя граница диапазона длин волн, см	Максимальная отраженная мощность, %	Толщина, мм	Масса квадратного метра, кг	Стоимость квадратного метра, дол. США
AN-W-72	1,5	1,5	3,2	0,4	48,5
AN-W-73	4,0	1	9,5	0,8	54
AN-W-74	8,6	1	15,9	1,2	63
AN-W-75	12,5	1	25,4	2,0	72
AN-W-77	32,0	1	63,5	3,5	117
AN-W-79	66,0	1	114,3	8,0	140

Наиболее характерным примером узкодиапазонных интерференционных материалов могут служить радиопоглощающие покрытия марок MX и MS (табл. 3.1). Основой покрытий служит каучук, смешанный с карбонильным железом. Тыльная сторона материалов покрывается медным листом или гибкой латунной тканью. В последнем случае покрытие можно изгибать по нужной форме.

Таким образом, используя на рабочем месте поглощающие материалы в нужном диапазоне радиоволн, возможно резкое снижение электромагнитной нагрузки до минимального уровня.

3.3. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В соответствии с ГОСТ 26170–84 "Контроль неразрушающий. Приборы радиоволновые. Общие технические требования" в паспорте и инструкции по эксплуатации на любое средство радиоволнового вида НК должны быть указаны частота (длина волны) и мощность (плот-

ность) излучения на данной частоте в зоне нахождения оператора. Как правило, уровни излучения должны быть не выше установленных санитарными нормами значений. При превышении должны быть даны рекомендации по применению конкретных средств защиты.

В случае необходимости проверки указанных параметров следует использовать стандартные средства: для измерения мощности – ваттметры (см. приложение 1), для измерения частоты – частотомеры или волномеры (см. приложение 2).

Однако для точных измерений параметров и, прежде всего, плотности электромагнитного излучения применяют комплект специальной аппаратуры "Медик" с участием сотрудников санитарно-технических служб, пользующихся методиками измерений ВНИИФТРИ. В комплект "Медик" входит большой набор широкодиапазонных устройств для точных радиотехнических измерений. В этом случае результаты измерений оформляют юридическим протоколом.

Глава 4

СТАНДАРТЫ В РАДИОВОЛНОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Применяемые в настоящее время в Российской Федерации нормативные документы и стандарты в этом виде НК сведены в табл. 4.1.

4.1. СТАНДАРТЫ РФ

ГОСТ 18353–79	Контроль неразрушающий. Классификация методов
РТМ 3-764–75	Контроль неразрушающий. Порядок организации и проведения работ. Показатели технического уровня и эффективности контроля
ГОСТ 23480–79	Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования
ГОСТ 13317–89	Элементы соединения СВЧ-трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры
ГОСТ 25313–82	Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения
РТМ 25687–84	Изделия приборостроения. Система условных обозначений
ГОСТ 12. 1.006–84	Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля
ГОСТ 26170–84	Контроль неразрушающий. Приборы радиоволновые. Общие технические требования
ГОСТ 26680–85	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы радиоволновые. Общие технические требования

Метрологическое обеспечение. Проблема метрологического обеспечения методов и, особенно, средств неразрушающего контроля стоит очень остро. При отсутствии требуемого метрологического обеспечения радиоволновые СВЧ-приборы не могут быть внедрены для произ-

водственного и эксплуатационного контроля, а их исследовательское использование не может давать достоверных экспериментальных данных. Для сравнительной оценки различных типов аппаратуры, ее настройки перед испытаниями, а также для периодической поверки используют

контрольные образцы или имитаторы. Контрольные образцы снабжают аттестатами, в которых указывают форму, размеры, массу образцов, размеры и глубину залегания дефектов средствами, предусмотренными аттестующей метрологической организацией.

Для проверки средств контроля непосредственно перед проведением контроля, а также испытаний методом сравнения с объектом часто на практике используют образцы, выбранные из числа забракованных или специально изготовленные с внесением определенного вида дефектов. В других случаях применяют "эталонные" объекты, которые достаточно полно измерены, так что характеристики их известны и признаны удовлетворительными. В отсутствие контрольных образцов используются СВЧ-имитаторы, позволяющие вызвать эквивалентные изменения того или иного параметра сигнала, как и от дефекта или от изменения геометрии. В качестве СВЧ-имитатора образцов толщины может быть применена пара прецизион-

ных волноводных устройств: аттенюатора и фазовращателя, с помощью которых можно задать с высокой точностью требуемые изменения амплитуды и фазы, эквивалентные изменениям на контрольных образцах. В случае использования контрольных образцов их количество определяют совокупностью решаемых задач. Для толщиномеров, как правило, требуются три контрольных образца: на концы и середину шкалы. Для дефектоскопов может быть использован один образец с внесением в него группы предполагаемых дефектов. Применяемые универсальные образцы объектов контроля не отвечают в полном объеме сегодняшним задачам метрологического обеспечения единства измерений и аттестации аппаратуры, поэтому продолжается работа, направленная на поиск и разработку системы, гарантирующей с известной точностью не только основную аттестуемую характеристику, но и все те, которые влияют на точность измерения основной характеристики данным неразрушающим методом.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В СВЧ-диапазоне измерения напряжения и тока теряют свое практическое значение, в то время как мощность остается одной из основных величин, которая может быть измерена непосредственно.

Измерители мощности подразделяют на два основных класса: измерители оконечной и проходящей мощности.

Измеритель оконечной мощности представляет собой оконечную нагрузку в линии передачи, в идеальном случае поглощающую всю падающую мощность и имеющую комплекс электротермических устройств для измерения этой мощности.

Измеритель проходящей мощности представляет собой секцию передающей линии, обеспечивающей сквозное прохождение мощности, при этом в ней поглощается лишь ее малая часть. Большая часть измерителей проходящей мощности представляет собой направленный ответвитель с оконечным измерителем мощности, подключенным к боковому плечу. Существуют и другие типы измерителей проходящей мощности: основанные на давлении излучения, использующие эффект Холла в полупроводниках; основанные на измерении малых потерь мощности в линии передач и т.п.

В настоящее время в технике точных измерений мощности наибольшее распространение получили приборы, принцип действия которых основан на преобразовании электромагнитной энергии СВЧ-излучения в тепловую и сравнении ее с энергией постоянного тока. Это калориметрические, болометрические и термоэлектрические приборы.

Калориметрические методы измерения мощности базируются на прямом преобразовании основной части измеряемой СВЧ-энергии в тепло. Проточные и статические калориметры измеряют мощность, опираясь на измерения температу-

ры, массы и времени. Частотный диапазон калориметров от постоянного тока до 75 ГГц и выше. Более распространенные проточные калориметры используют для измерения средней ($10^{-3} \dots 1$ Вт) и высокой ($1 \dots 10^6$ Вт) мощности. С помощью статических калориметров измеряют малую ($10^{-8} \dots 10^{-2}$ Вт) и среднюю мощность. Погрешность измерения составляет 0,3 ... 20 % и зависит от уровня мощности, частотного диапазона, погрешностей индикаторной части и систем стабилизации калориметра. Преимущество калориметрических методов – высокая точность при средних и больших мощностях. Основные недостатки – сложность конструкций и большое время измерений (от минут до нескольких часов).

Основными элементами проточных калориметров являются: нагрузка для преобразования электромагнитной энергии в тепловую энергию в жидкости, система для циркуляции жидкости и средства для измерения ее разности температур.

Болометрические измерители мощности. В большинстве применяемых в настоящее время измерителей мощности в качестве чувствительного элемента работает болометр, который представляет собой термочувствительный резистивный элемент. Изменение сопротивления болометра вследствие нагрева поглощенной мощностью измеряют внешним прибором или мостовой схемой. Чаще сопротивление болометра поддерживается неизменным с помощью замещающей мощности постоянного тока или тока низкой частоты. Болометрические измерители мощности обладают сравнительно высокой чувствительностью и используются для измерения малых уровней мощности ($10^{-6} \dots 10^{-1}$). Болометр устанавливается в волноводной головке, имеющей малые отражения. Один из выводов изолирован от волновода и доступен для измерений сопротивления; другим выводом служит волновод.

Погрешность болометрических измерений мощности составляет 0,5 ... 3 % в зависимости от КПД головки, качества согласования и вспомогательного оборудования для измерения сопротивления болометра.

Преимуществами болометрических измерителей мощности являются их малые габариты, удобство в эксплуатации и сравнительно высокая чувствительность. Основным недостатком заключается в том, что они должны отдавать поглощаемую энергию в окружающую среду, а следовательно, их трудно изолировать от внешних температурных изменений. Часто в измерителях мощности предусматривается температурная компенсация, которая позволяет нейтрализовать изменения окружающей температуры. Обычно это достигается использованием второго болометра и второй мостовой схемы. Температурная чувствительность (т.е. изменение мощности, отнесенное к изменению окружающей температуры) таких измерителей мощности компенсационного типа, как правило, на один или два порядка ниже, чем у некомпенсационных приборов.

Существуют несколько типов болометров: барретор, термистор, пленочный болометр и волноводный болометр. В России наиболее часто используют термисторы, пленочные и нитяные болометры, барреторы.

Термистор представляет собой маленькую бусинку из полупроводящего материала с тонкими проволочными выводами. От других болометров его отличает отрицательный температурный коэффициент и намного большая постоянная времени (приблизительно 0,1 с). Для термистора характерны значительные пределы изменения сопротивления. Кроме того, он отличается устойчивостью к механическим воздействиям и перегрузкам по мощности, так как в этом случае его сопротивление падает и соответственно уменьшается мощность, выделяющаяся на термисторе.

В технике миллиметрового диапазона волн часто используют *тонкопленочный болометр*. Он представляет собой тонкую металлическую пленку, осажденную в вакууме на стеклянной или слюдяной подложке. Форму и сопротивление пленки можно сделать такими, чтобы имело место хорошее согласование с волноводом. Поскольку эти резистивные элементы чрезвычайно тонки, глубина скин-слоя на самых высоких частотах больше толщины пленки, и так как их физические размеры малы по сравнению с длиной волны, и распределение тока будет почти постоянным. Поэтому предполагается, что тонкопленочный болометр имеет одинаковые сопротивления на постоянном и переменном токах. Такие болометры позволяют измерять уровни мощности вплоть до 100 мВт.

Нитяной болометр представляет собой короткий отрезок тонкой волластовской проволоки, смонтированный в диэлектрическую капсулу с металлическими выводами. Он характеризуется положительным температурным коэффициентом, малой постоянной времени (50 ... 400 мкс) и линейным изменением сопротивления при малых уровнях мощности.

Барретор используют для непосредственного измерения малых уровней мощности. К недостаткам барретора следует отнести его механическую хрупкость и неспособность выдерживать перегрузки по мощности.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Частоту электромагнитных колебаний измеряют *частотомерами* (измерителями частоты) и *волномерами* (измерителями длины волны). Поскольку частота колебаний и длина волны взаимно связаны, в технической литературе между ними строгих разграничений не делают.

Основные характеристики частотомеров и волномеров – точность измерения и чувствительность.

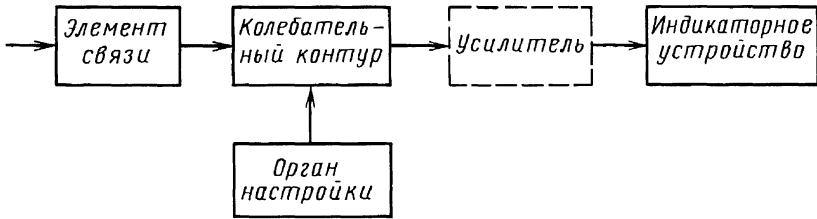


Рис. 1. Блок-схема резонансного волномера

По точности измерений прибора делятся на следующие группы:

- малой точности, с погрешностью 0,1 ... 3 %;
- средней точности, с погрешностью 0,01 ... 0,1 %;
- высокой точности, с погрешностью менее 0,01 %.

Чувствительность частотомеров и волномеров (т.е. минимальная мощность на входе, при которой на индикаторе имеется достаточное для отсчета напряжение) весьма высока – 0,1 ... 2 мВт.

Схема и конструкции частотомеров и волномеров, а также методы измерения зависят от необходимой точности измерений и диапазона измеряемых частот (волн).

В основном применяют два типа волномеров: резонансный и гетеродинный. Резонансные волномеры просты по устройству и обладают достаточной точностью измерений (0,01 ... 3 %). Гетеродинные волномеры значительно сложнее резонансных, но точность измерений у них выше – до 10^{-4} ... 10^{-5} %.

Блок-схема резонансного волномера приведена на рис. 1.

Колебательный контур связан с источником исследуемых колебаний. В процессе измерения настройку контура изменяют так, чтобы он оказался настроенным в резонанс с исследуемыми колебаниями, т.е. его резонансная частота была равна частоте этих колебаний. Значение резонансной частоты контура определяют по положению его органа настройки, а резо-

нанс отмечается по показанию индикаторного устройства, связанного с контуром.

Конструкция всех элементов волномера, особенно колебательного контура, зависит от диапазона волн, для которого он предназначен.

На сантиметровых волнах точно измерить частоту можно резонансными волномерами с объемными резонаторами.

На рис. 2 показана схема одного из таких волномеров.

Объемный резонатор цилиндрической или прямоугольной формы связан с

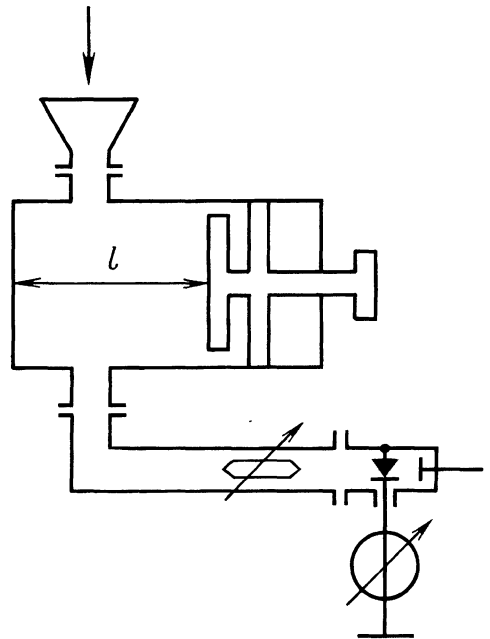


Рис. 2. Волномер с объемным резонатором

источником измеряемых колебаний и индикаторным устройством через щели в стенках резонатора, петли или зонды связи.

Резонатор можно настраивать на ту или иную частоту с помощью короткозамыкающего поршня, связанного с микрометрическим винтом. Для того чтобы качество трущегося контакта поршня не влияло на добротность резонатора, иногда применяют бесконтактные поршни, по принципу действия аналогичные дроссельным и вращающимся соединениям волноводов.

Порядок измерения частоты подобным волномером такой же: после настройки контура в резонанс определяют по микрометрическому винту длину резонатора l и по этой длине и графику находят частоту исследуемых колебаний.

Точность измерения волномером в основном определяется "остротой" резонансной кривой контура. Как известно, ширина резонансной кривой зависит от добротности контура: чем выше добротность, тем "острее" кривая.

Волномеры с объемными резонаторами применяются на волнах 1 ... 15 см; точность 0,01 ... 0,05 %.

Сущность **гетеродинного метода** измерения частоты, или метода сравнения, заключается в следующем.

На смеситель подают напряжения неизвестной частоты f_x от источника исследуемых колебаний и известной частоты f_3 от эталонного генератора. На выходе смесителя возникает напряжение разностной частоты (напряжение биений). Частота биений

$$\pm F_6 = f_x - f_3.$$

Это значение частоты биений измеряют частотомером. Обычно оно лежит в области звуковых частот.

Так как значения f_3 и F_6 при измерении оказываются известными, то неизвестная

$$f_x = f_3 \pm F_6.$$

В частности, частота биений может быть равна нулю, тогда

$$f_x = f_3.$$

В этом случае частотомер заменяют индикатором нулевой частоты: телефонами, электронно-оптическим индикатором или аналоговым прибором.

Основное достоинство гетеродинных волномеров - большая точность измерения частоты, обусловленная возможностью очень точно (в единицах и десятках герц) определить равенство или разность измеряемой и эталонной частоты.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ-ТРАКТОВ

Качество работы линии передачи характеризуется коэффициентом стоячей волны (КСВ) и затуханием. В эксплуатационной практике наибольшее значение имеет КСВ и связанный с ним коэффициент отражения.

Как известно, для эффективной работы линии передачи желательно, чтобы в линии установилась бегущая волна. Однако наряду с бегущей волной в линии образуются и отраженные волны. Складываясь с бегущей волной, они приводят к появлению стоячей волны, которая и характеризуется коэффициентом стоячей волны.

КСВ – это отношение максимального напряжения в линии (напряжения в пучности U_{\max}) к минимальному (напряжения в узле U_{\min}):

$$\text{КСВ} = U_{\max} / U_{\min}.$$

При отсутствии отраженных волн минимумы и максимумы напряжений вдоль линии отсутствуют и $\text{КСВ} = 1$. Если отраженная и падающая волны напряжения $U_{\text{отр}}$ и $U_{\text{пад}}$ равны по амплитуде, то $U_{\min} = 0$ и $U_{\max} = 2U_{\text{пад}}$, тогда $\text{КСВ} = \infty$.

Иногда качество работы линии характеризуют другим коэффициентом – коэффициентом бегущей волны (КБВ). Оба коэффициента связаны соотношением

$$\text{КБВ} = 1/\text{КСВ}.$$

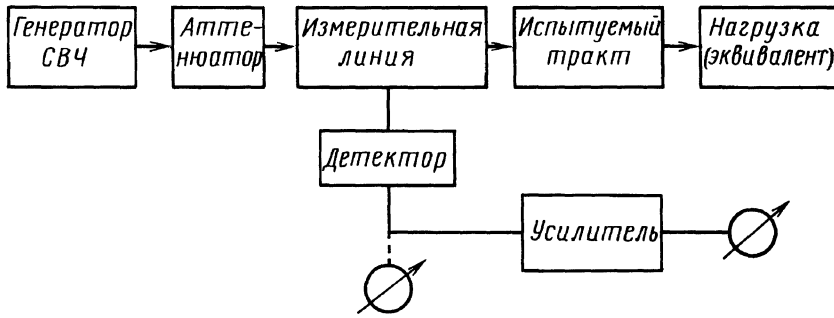


Рис. 3. Схема измерения КСВ с помощью измерительной линии

С увеличением КСВ передаваемая в нагрузку мощность уменьшается. При большом КСВ в результате появления пучностей напряжения в линии могут возникать пробой.

Кроме того, при стоячей волне линия передачи имеет реактивную составляющую входного сопротивления, что в большинстве случаев ухудшает работу генератора, к которому линия подключена.

Главные причины большого КСВ – плохое согласование нагрузки с линией, неоднородности в линии и плохая стыковка ее отдельных частей.

Линии передачи настраивают по минимальному значению КСВ.

Стоячую волну характеризуют также коэффициентом отражения p , под которым подразумевают отношение напряжения отраженной волны к напряжению падающей волны в месте отражения.

Коэффициент отражения p связан с коэффициентом стоячей волны соотношением

$$КСВ = \frac{1 + |p|}{1 - |p|},$$

где $|p|$ – абсолютная величина коэффициента отражения, равная отношению амплитуд отраженной ($U_{отр}$) и падающей ($U_{пад}$) волн:

$$|p| = \frac{U_{отр}}{U_{пад}}.$$

Таким образом, зная коэффициент отражения, можно определить КСВ, и наоборот.

КСВ измеряют с помощью измерительных линий, рефлектометров и мостовых схем.

Наиболее распространены методы измерения КСВ путем измерительных линий и рефлектометров.

Схема измерения КСВ с помощью измерительной линии показана на рис. 3.

Измерительная линия включается последовательно с испытуемым трактом, имеющим обычную нагрузку (антенну, эквивалент антенны). Источником высокочастотных колебаний служит маломощный генератор. Он настраивается на частоту и может работать незатухающими или модулированными колебаниями. В последнем случае в измерительной схеме можно использовать усилитель низкой частоты и таким образом повысить чувствительность схемы и точность ее работы. Обычно генератор снабжен волномером. Между генератором и измерительной линией устанавливается поглощающий аттенюатор (иногда он входит в состав генератора). Аттенюатор выполняет несколько функций. Он ослабляет связь измерительной линии с цепями генератора. При сильной связи и большом КСВ в линии может измениться частота генератора и нарушиться его нормальный режим работы. Затухание аттенюатора устанавливается в зависимости от величины ожидаемого

КСВ. Атенуатор служит нагрузкой генератора и поглощает отраженные волны. Атенуатором можно изменять величину мощности в измерительной линии.

Измерительная линия представляет собой отрезок волноводной линии, наружная стенка которой имеет продольную щель. В щель вставляется небольшой штырь – зонд. Зонд выполняет функцию приемной антенны. Для уменьшения влияния зонда на линию его погружают на очень небольшую глубину. С зондом связан колебательный контур, настраиваемый на волну генератора. С контуром, в свою очередь, связаны детектор и прибор постоянного тока.

Колебательный контур при резонансе усиливает колебания, принятые зондом, и таким образом повышает чувствительность измерительной линии. Кроме того, он уменьшает влияние на нее зонда.

Если от генератора в линию подаются модулированные колебания, то после детектирования напряжение усиливается усилителем низкой частоты и затем поступает на вольтметр. Показания вольтметра зависят от напряженности поля в линии и амплитудной характеристики индикаторного устройства (детектора и усилителя). Последняя бывает линейной или подчиняется более сложному закону. Обычно ее форму приходится определять опытным путем.

Зонд и колебательный контур с детектором размещены на передвижной каретке, величина перемещения которой отмечается на неподвижной линейке. Перемещая каретку с зондом вдоль щели, можно фиксировать относительную величину напряженности поля вдоль измерительной линии.

Амплитудную характеристику индикаторного устройства, т.е. зависимость показаний прибора от напряжения, подводящего к зонду, определяют следующим образом.

Замыкают накоротко конец измерительной линии. В линии устанавливается

стоячая волна, для которой распределение напряжения вдоль линии известно:

$$U = U_n \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right),$$

где U – напряжение в сечении линии на расстоянии l от узла напряжения; U_n – напряжение в пучности; λ – длина волны.

Помещают зонд в пучность напряжения и регулируют мощность генератора, питающего линию так, чтобы прибор индикаторного устройства отмечал максимальные показания.

Устанавливая далее зонд на различные расстояния l от узла напряжения, замечают показания прибора α . Для каждого значения вычисляют отношение напряжения в данном месте линии к напряжению в пучности:

$$\frac{U}{U_n} = \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right).$$

По найденным значениям U/U_n и α показаниям строят график – амплитудную характеристику индикаторного устройства $\alpha = f(U/U_n)$.

Длину волны, входящую в формулу, определяют предварительно с помощью той же измерительной линии по расстоянию между соседними узлами напряжения M :

$$\lambda/2 = M.$$

Точность измерения КСВ измерительной линией 5 ... 10 %.

Рефлектометром определяется не КСВ, а коэффициент отражения, т.е. отношение напряжений отраженной и падающей волн в линии. Зная коэффициент отражения p , можно вычислить и КСВ.

Принцип действия рефлектометра поясняет рис. 4.

Между генератором и исследуемым трактом с нагрузкой включается волновод рефлектометра. Он связан с двумя направленными ответвителями, расположенными так, что с выхода одного из них снимается

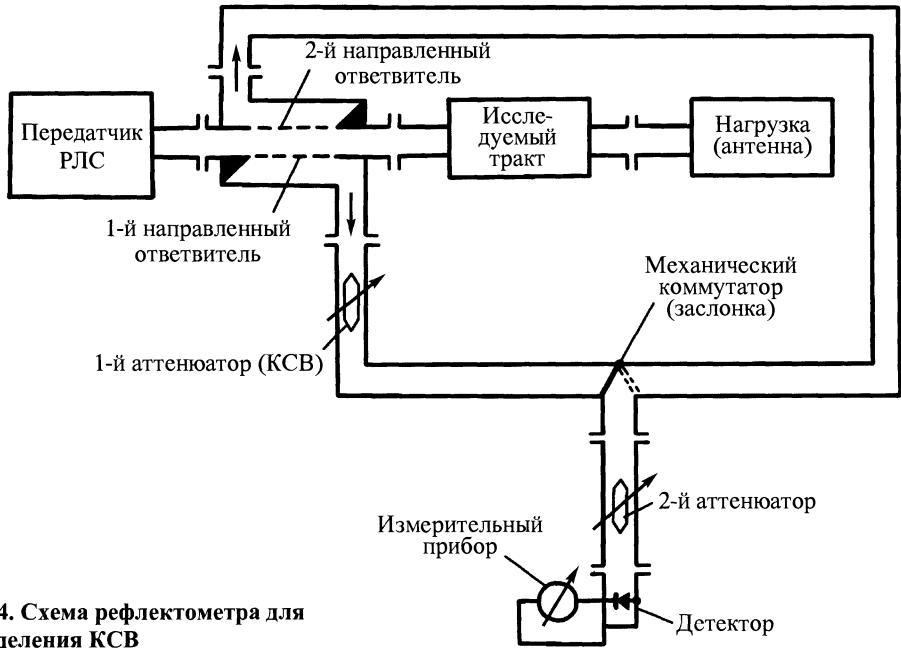


Рис. 4. Схема рефлектометра для определения КСВ

часть мощности падающей волны, а с выхода другого – отраженной.

В волноводе, по которому на детектор подаются колебания падающей волны, установлен первый аттенюатор, называемый также аттенюатором КСВ.

Колебания с выходов ответвителей можно с помощью механической заслонки (коммутатора) подавать на детектор, в цепь которого включен прибор постоянного тока. Величину мощности колебаний, поступающих на детектор, изменяют, пользуясь вторым аттенюатором.

Для определения КСВ при работающем генераторе устанавливают заслонку коммутатора так, чтобы на детектор поступали колебания отраженной волны. С помощью второго аттенюатора выводят стрелку прибора на какое-нибудь деление в средней части шкалы. Затем заслонку устанавливают в положение, при котором на детектор поступают колебания падающей волны. Далее с помощью первого аттенюатора переводят стрелку прибора в первоначальное положение. Очевидно, что

чем больше различаются мощности падающей и отраженной волн, тем больше придется вводить первый аттенюатор для уравнивания мощностей колебаний на входе детектора.

Поэтому затухание первого аттенюатора является функцией отношения мощностей отраженной и падающей волн, а следовательно, и коэффициент отражения связан с КСВ, как было показано ранее.

Таким образом, по величине затухания, установленной на первом аттенюаторе, можно определить КСВ в линии. Для удобства измерения этот аттенюатор градуирован в значениях КСВ.

Волноводный тракт настраивают или по минимальному значению КСВ или, что в данном случае более удобно, по минимальному значению мощности отраженной волны.

Точность определения КСВ с помощью рефлектометра составляет 5 ... 10 %. Большую точность дает мостовой метод (1 ... 5 %), однако применяется он редко.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ ЗНАНИЯМ ПЕРСОНАЛА, РАБОТАЮЩЕГО В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПО РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ I, II, III УРОВНЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ

I уровень	II уровень	III уровень
Часть 1. ОСНОВЫ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ*		
1.1. Физические принципы. Колебания, волны, электромагнитные волны, модулированные волны и импульсное излучение. Скорость распространения, длина волны, частота	1.1. Физические принципы. Спектральный состав модулированного и импульсного излучения, типы волн	1.1. Физические принципы. Поляризация электромагнитных волн, дисперсия скорости и затухание волн
1.2. Принципы отражения электромагнитных волн при нормальном падении на границу раздела двух сред, влияние шероховатости поверхности	1.2. Отражение электромагнитных волн при нормальном падении на границу раздела двух сред, электромагнитный импеданс, коэффициенты отражения и преломления (прохождения)	1.2. Отражение электромагнитных волн при нормальном падении, стоячие волны, описание стоячей волны; отражение от границы раздела двух сред, разделенных диэлектрическим слоем
1.3. Принципы отражения и преломления электромагнитных волн при наклонном падении, расчет угла преломления	1.3. Принципы отражения и преломления электромагнитных волн при наклонном падении, законы отражения и преломления, углубленное знание предмета	1.3. Отражение электромагнитных волн при наклонном падении, случаи параллельной и перпендикулярной поляризаций волн
1.4. Отражение электромагнитных волн от плоского диэлектрического слоя. Коэффициент отражения	1.4. Отражение электромагнитных волн от диэлектрического слоя. Коэффициенты отражения и прохождения	1.4. Отражение электромагнитных волн от диэлектрического слоя. Коэффициент отражения и его зависимость от угла падения электромагнитной волны при различных поляризациях. Полное внутреннее отражение
1.5. Интерпретация отражений электромагнитных волн (радиоволн) от границы раздела. Интерференция радиоволн	1.5. Интерпретация отражений электромагнитных волн (радиоволн) от границы раздела. Расчет коэффициента отражения от диэлектрического слоя	Интерпретация и расчет коэффициентов отражения и прохождения от диэлектрического слоя. Отражение пучка радиоволн
1.6. Отражение радиоволн отражателями различных типов и размеров (отражение и рассеяние)	1.6. Отражение радиоволн отражателями различных типов и размеров (отражение, рассеяние, интерференция, дифракция)	1.6. Отражение радиоволн отражателями различных типов и размеров. Резонансные явления

*Радиоволновой контроль производится чаще всего с использованием сверхвысоких частот (СВЧ), поэтому иногда употребляются другие названия метода – "СВЧ-контроль" и "Микроволновой (microwave) контроль".

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
<p>1.7. Зависимость отражения от изменения формы, размеров и положения отражателя (принцип)</p>	<p>1.7. Отражение от определенных отражателей. Закономерности, связывающие амплитуду и фазу сигнала с расстоянием при отражении от задней границы диэлектрического слоя, диэлектрического и металлического включений. Сравнение с реальными дефектами</p>	<p>1.7. Отражение от геометрических определенных отражателей. Поверхностные волны, коэффициент связи</p>
<p>1.8. Принципы генерации и приема радиоволн сверхвысоких частот; режимы работы преобразователей</p>	<p>1.8. Генерация радиоволн сверхвысоких частот. Электронные (магнетрон, клистрон) и полупроводниковые (ГЛПД, Ганна) СВЧ-генераторы. Свойства СВЧ-преобразователя (частота, ширина полосы частот, мощность, чувствительность, диаграмма направленности)</p>	<p>1.8. Генерация и прием радиоволн сверхвысоких частот, углубленное знание предмета</p>
<p>1.9. Электромагнитное поле (влияние частоты, размеров элементов преобразователя, оценка длины ближней и дальней зон, расхождения пучка радиоволн)</p>	<p>1.9. Электромагнитное поле. Расчет и оценка характерных параметров СВЧ-излучателей (ближняя и дальняя зоны, диаграмма направленности, расхождение пучка). Углубленные знания</p>	<p>1.9. Электромагнитное поле, фокусировка</p>
<p>1.10. Влияние свойств объектов на распространение радиоволн (скорость, амплитуду, фазу, поляризацию, ослабление; форма и обработка поверхности)</p>	<p>1.10. Влияние свойств объектов на распространение радиоволн. Затухание радиоволн (причина, действие и принцип измерения). Форма поверхности и ее обработка (изменение параметров электромагнитного поля, влияние на амплитуду и фазу отраженного сигнала, изменение направления распространения, искажения волнового фронта (причина, влияние и принцип измерения)</p>	<p>1.10. Влияние свойств объектов на распространение радиоволн. Анизотропия свойств</p>

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
Уровень II включает в себя знания по уровню I, а уровень III включает в себя знания по уровням I и II		

Часть 2. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ

<p>2.1. Конструкция и режим работы. Типовая блок-схема радиоволнового СВЧ-прибора с одним преобразователем. Функции элементов. Виды преобразователей: совмещенный (с одной антенной), с отдельными антеннами, для нормального падения волн, для наклонного падения, с круговой поляризацией; конструкции и режимы работы</p>	<p>2.1. Конструкция и режим работы. Типовая блок-схема радиоволнового СВЧ-прибора с одним и двумя преобразователями. Преобразователи для возбуждения поверхностных волн, с согласующим слоем, с фокусировкой пучка; конструкции и режимы работы</p>	<p>2.1. Конструкция и режим работы. Многоэлементные преобразователи с фотоуправляемой полупроводниковой пластиной (ФУПП); конструкции и режим работы</p>
<p>2.2. Характеристики оборудования и системы. Основные технические и метрологические параметры радиоволновых приборов для неразрушающего контроля и диагностики. Свойства источников питания для полупроводниковых СВЧ-генераторов. Свойства усилителей и преусилителей. Свойства модуляторов</p>	<p>2.2. Измерение разрешающей способности СВЧ-преобразователей. Связь между разрешающей способностью и техническими конструктивными параметрами СВЧ-преобразователей. Коэффициент стоячей волны (КСВ) волноводных элементов СВЧ-преобразователя. Параметры антенн</p>	<p>2.2. Характеристики оборудования и управления системы. Паразитные сигналы, их причина, способы обнаружения, измерения и уменьшения. Техника безопасности (частота, энергетическая нагрузка, плотность потока излучения)</p>
<p>2.3. Представление сигнала. Амплитуда отраженного (прошедшего) сигнала, отношение амплитуд сигналов, измерения с помощью калиброванного аттенюатора. Смещение положения экстремумов сигнала</p>	<p>2.3. Представление сигнала. Линейное и логарифмическое отображение амплитуд отраженных сигналов. Разность фаз сигналов. Использование измерительных линий и калиброванных короткозамыкающих поршней</p>	<p>2.3. Представление сигнала. Черно-белое и цветное отображение, система "сигнал-частота – цвет"</p>
<p>2.4. Мониторы</p>	<p>2.4. Системы регистрации "Да – Нет" (приемка – бракование) Монитор с цветным изображением</p>	<p>2.4. Мониторы. Углубленные знания</p>
<p>2.5. Регистрирующее оборудование</p>	<p>2.5. Регистрирующее оборудование. Критерии выбора</p>	<p>2.5 Регистрирующее оборудование: самописец, цифropечатающее. устройство, термобумага, цветной маркер, принтер</p>

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
2.6. Механизированные и автоматизированные устройства контроля	2.6. Механизированные и автоматизированные устройства. Сканирующие системы (электромеханические, электронные, комбинированные)	2.6. Механизированные и автоматические устройства контроля. Принцип контроля, чувствительность, сбор данных результатов контроля

Часть 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

3.1. Амплитудно-фазовый метод (режим отражения), основные принципы. Измеряемые параметры (амплитуда отраженного сигнала, фаза, положение экстремумов интерференционной картины)	3.1. Амплитудно-фазовый метод. Зависимость информативных параметров от толщины диэлектрического слоя и от диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь	3.1. Амплитудно-фазовый метод. Теория и применение. Принцип устранения интерференционных явлений (качение частоты)
3.2. Метод прохождения. Основные принципы, измеряемые параметры	3.2. Метод прохождения. Устранение (учет) интерференции внутри диэлектрического слоя	3.2. Метод прохождения. Измерение интегральных характеристик объекта контроля (диэлектрического слоя)
3.3. Частотный метод. Метод переменной частоты, возможности, области применения	3.3. Метод переменной частоты. Возможности контроля толщины слоя при одностороннем доступе при неизвестных (диэлектрических свойствах материала)	3.3. Частотный метод. Возможности контроля толщины, диэлектрических свойств 2- и 3-слойных конструкций при одностороннем доступе
3.4. Геометрический метод. Измерение толщины диэлектрической конструкции (плоского слоя)	3.4. Геометрический метод. Измерение глубины залегания дефектов	3.4. Геометрический метод. Использование согласующих пластин на границах раздела
3.5. Поляризационный метод. Использование линейно-поляризованных антенн	3.5. Поляризационный метод. Использование волн круговой (эллиптической) поляризации	3.5. Поляризационный метод. Метод эллипсометрии, принцип, основные соотношения, области применения
3.6. Метод поверхностных волн. Диэлектрические волноводы и их использование	3.6. Метод поверхностных волн. Связанные волны. Коэффициент связи. Глубина контроля	3.6. Метод поверхностных волн. Теория и применение
3.7. Эффект Доплера. Зависимость частоты отраженного сигнала от скорости объекта контроля	3.7. Измерение параметров динамических процессов (скорости горения, перемещения, движения)	3.7. Теория и применение эффекта. Доплера в диапазоне радиоволн сверхвысоких частот для диагностики динамических объектов контроля
3.8. СВЧ-томография. Принципы построения СВЧ-томографов	3.8. СВЧ-томография. Элементы конструкции СВЧ-томографа	3.8. СВЧ-томография. Основные параметры экспериментальных СВЧ-томографов. Медицинский СВЧ-томограф

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
3.9. Основные области применения радиоволновых методов неразрушающего контроля, решаемые задачи, достижимые результаты	3.9. Основные области применения радиоволновых методов. Преимущественные области применения	3.9. Основные области применения радиоволновых методов и сред для целей неразрушающего контроля и диагностики, включая специальные знания

Часть 4. НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

4.1. Настройка элементов СВЧ-преобразователя. Настройка СВЧ-генератора на рабочую частоту, проверка (измерение) излучаемой мощности. Измерение КСВ волноводных элементов преобразователя на рабочей длине волны. Согласование СВЧ-тракта (настройка на минимум КСВ) с использованием волноводных трансформаторов сопротивлений. Использование измерительных линий, волномеров (частотомеров), измерителей мощности	4.1. Настройка элементов СВЧ-преобразователя. Настройка элементов СВЧ-преобразователя с использованием панорамных широкодиапазонных измерителей КСВ, возможности оптимизации настройки	4.1. Настройка типовых элементов СВЧ-преобразователей. Цели настройки. Элементы для коррекции настройки
4.2. Настройка СВЧ-преобразователя. Составление программы и методики настройки. Настройка с использованием стандартной измерительной аппаратуры (источник питания, осциллограф, измерительная линия, измерительный усилитель, панорамный измеритель КСВ)	4.2. Настройка СВЧ-преобразователя. Цели настройки. Настройка и проверка основных технических и метрологических параметров СВЧ-преобразователей с использованием стандартных и контрольных образцов	4.2. Настройка СВЧ-преобразователя. Использование стандартных образцов и имитаторов. Принципы имитации контролируемых и влияющих параметров. Калибровка параметров СВЧ-преобразователя
4.3. Настройка системы и проверка чувствительности с использованием геометрически определенных отражателей (диэлектрический клин, четвертьволновые и полуволновые слои, цилиндрический и сферический отражатели) и сравнение информативных параметров сигнала (амплитуды, фазы) с постоянным уровнем (эталонным сигналом, например, от металлического зеркала)	4.3. Настройка системы и проверка чувствительности с использованием стандартных образцов	4.3. Настройка системы и проверка чувствительности с использованием эталонных, стандартных, контрольных образцов и имитаторов. Калибровка системы

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
4.4. Настройка системы и проверка чувствительности, разрешающей способности в динамических условиях (в полосе рабочих частот, изменений излучаемой мощности, температуры, вибрации)	4.4. Настройка системы и проверка основных параметров в динамических условиях с использованием стандартных образцов. Оценка погрешности	4.4. Настройка СВЧ-системы. Выбор и методика применения соответствующих методов коррекции

Часть 5. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ И ИХ ОБРАЗОВАНИЕ

5.1. Производство изделий из полимерных и композиционных материалов: дефекты, структура, текстура	5.1. Производство изделий из пластмасс, композиционных материалов; вязкость, отверждение, влажность, текстура	5.1. Технологические процессы при производстве диэлектрических изделий как объекты неразрушающего контроля
5.2. Виды дефектов и причины их возникновения в заготовках и полуфабрикатах из диэлектрических (непроводящих) материалов	5.2. Виды дефектов и причины их возникновения в отливках из непроводящих материалов	5.2. Виды дефектов и причины их возникновения в необработанном материале
5.3. Виды дефектов и причины их возникновения в керамических изделиях	5.3. Виды дефектов и причины их возникновения при термических процессах в производстве керамической продукции	5.3. Виды дефектов и причины их возникновения во время обработки и других технологических (термических) процессах
5.4. Структурные неоднородности, анизотропия свойств	5.4. Возникновение и распространение анизотропии. Возрастание и концентрация напряжений, микротрещины, деформации	5.4. Виды дефектов, причины их возникновения, измерения при нарушениях структуры объекта; то же, что и на уровнях I и II, более глубокие знания

Часть 6. МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ, УЧЕТ СВОЙСТВ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

6.1. Диэлектрические свойства материалов (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь), частотная дисперсия свойств, анизотропия свойств	6.1. Учет свойств материалов, конструктивных особенностей, затухания, плотности, влажности полуфабрикатов и изделий из непроводящих (диэлектрических) материалов	6.1. Свойства материалов и изделий, их знание и учет; то же, что и на уровне II, более глубокие знания
6.2. Геометрия материала	6.2. Выбор типа преобразователя и оценка траектории распространения электромагнитного поля в контролируемом объекте	6.2. Геометрия материала. Математическое моделирование условий взаимодействия электромагнитного поля с объектом контроля
6.3. Влияние качества, шероховатости, неровности поверхности	6.3. Влияние качества поверхности, искажение волнового фронта, общая оценка	6.3. Влияние качества поверхности. Более глубокие знания

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
6.4. Анизотропия материала (естественная, искусственная)	6.4. Напряженно-деформированное состояние изделий	6.4. Анизотропия, механические и тепловые остаточные напряжения
6.5. Ориентация дефектов, зависимость выявляемости	6.5. Вероятность обнаружения в зависимости от типа, места расположения и ориентации дефекта	6.5. Способы идентификации дефектов
6.6. Учет доступа к изделию (односторонний, двухсторонний), зона контроля (локальность), возможность контакта	6.6. Выбор типа СВЧ-преобразователя в зависимости от доступности объекта или его зон	6.6. Методика контроля в зависимости от доступности объекта
6.7. Развитие метода контроля. Краткий обзор других методов неразрушающего контроля (в сравнении, на примере конкретной задачи).	6.7. Общие знания по другим методам (акустическому, электрическому, тепловому, оптическому; на примере применения для неразрушающего контроля огнеупоров)	6.7. Развитие метода контроля. Совмещенный преобразователь с использованием СВЧ- и УЗ-методов для дефектоскопии расслоений в стеклопластиках

Часть 7. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ В КОДАХ, СТАНДАРТАХ И Т.Д.

7.1. Содержание стандартов	7.1. Содержание стандартов, руководящих документов, технических условий	7.1. Интерпретация стандартов, руководящих документов и технических условий
7.2. Выполнение контроля в соответствии с инструкциями и техническими условиями	7.2. Выбор метода и параметров контроля для простых случаев с учетом области применения, имеющегося оборудования, выбора преобразователя, методики настройки, проведения контроля и регистрации результатов	7.2. Выбор метода контроля, удовлетворяющего требованиям соответствующих стандартов и технических условий
—	—	7.3. Установление предприятий по контролю для сложных случаев с рассмотрением действующих нормативных документов

Продолжение прилож. 4

I уровень	II уровень	III уровень
-----------	------------	-------------

**Часть 8. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ ЗНАНИЯМ ПЕРСОНАЛА
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ**

8.1. Контроль характеристик оборудования	8.1. То же, что и для уровня I, более глубокие знания	8.1. Выбор метода контроля, определение погрешностей
8.2. Контроль настройки (частоты, мощности, чувствительности)	8.2. То же, что и для уровня I, более глубокие знания	8.2. То же, что и для уровня II
8.3. Проведение контроля в соответствии с инструкциями	8.3. То же, что и для уровня I	8.3. То же, что и для уровня II
8.4. Данные контроля. Место расположения дефектов, амплитуда (фаза) отраженных сигналов, размеры дефектов	8.4. То же, что и для уровня I	8.4. То же, что и для уровня II
8.5. Регистрация результатов контроля, документация. Регистрация параметров оборудования и градуировки	8.5. То же, что и для уровня I	8.5. То же, что и для уровня II

Часть 9. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

9.1. Общая интерпретация результатов контроля	9.1. Интерпретация результатов контроля в соответствии с требованиями стандартов	9.1. Оценка результатов контроля с учетом требований стандартов
-	-	9.2. Установление требований стандартов в сотрудничестве со специалистами в области создания объектов контроля и диагностирования
-	-	9.3. Контролепригодность. Сотрудничество со специалистами в области создания объектов контроля и диагностирования (особенно на этапе проектирования)

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ

I уровень квалификации

1. Какова природа радиоволны?
 - а) упругие колебания;
 - б) электрические колебания;
 - в) электромагнитные колебания.
2. Радиоволны отражаются от:
 - а) металлических конструкций;
 - б) полупроводниковых структур;
 - в) диэлектрических изделий;
 - г) любых материальных сред.
3. Какова приблизительно скорость распространения радиоволн в свободном пространстве?
 - а) 50 км/с;
 - б) 200 км/с;
 - в) $3 \cdot 10^5$ км/с;
 - г) $2 \cdot 10^6$ км/с.
4. Радиоволны проходят через:
 - а) слой морской воды толщиной 1 км;
 - б) стальной лист толщиной 1 мм;
 - в) лист гетинакса толщиной 3 мм.
5. Какая длина волны излучения относится к СВЧ-диапазону радиоволн?
 - а) 200 м;
 - б) 0,02 м;
 - в) $2 \cdot 10^{-6}$ м;
 - г) $2 \cdot 10^{-8}$ м.
6. В каком виде НК преимущественно используется электромагнитное излучение на частоте 37 ГГц?
 - а) в радиоволновом;
 - б) в радиационном;
 - в) в оптическом.
7. Какой материал лучше экранирует СВЧ-радиоволны?
 - а) вольфрам;
 - б) медь;
 - в) алюминий;
 - г) никром.
8. Чем характеризуется когерентное монохроматичное электромагнитное излучение?
 - а) широким спектром излучения;
 - б) малой нестабильностью частоты и мощности излучения;
 - в) стабильностью одной частоты излучения.
9. При каком условии наблюдается отражение радиоволн от границы раздела двух сред?
 - а) при равенстве диэлектрических свойств двух сред?
 - б) при равенстве волновых сопротивлений двух сред;
 - в) когда диэлектрические свойства отличаются (например, в 2 раза).
10. Чем принципиально отличается идеальный диэлектрик от несовершенного диэлектрика?
 - а) величиной диэлектрической проницаемости;
 - б) плотностью;
 - в) химическим составом;
 - г) величиной тангенса угла диэлектрических потерь.
11. Что является информативным параметром при амплитудном методе радиоволнового контроля?
 - а) частота сигнала;
 - б) амплитуда сигнала;
 - в) поляризация сигнала;
 - г) направление прихода сигнала.
12. Отличаются ли параметры отраженных сигналов при наклонном падении на границу раздела двух сред радиоволн разных поляризаций?
 - а) отличаются по амплитуде и фазе;
 - б) не отличаются;
 - в) отличаются только по амплитуде;
 - г) отличаются только по фазе.

13. С помощью радиоволновых методов можно осуществлять НК:

- а) внутренней структуры металлоизделий;
- б) формы металлоизделий;
- в) температуры металлоизделий.

14. Возможен ли радиоволновой контроль влажности зерна?

- а) невозможен;
- б) возможен без ограничений;
- в) возможен с ограничениями.

15. Можно ли с помощью радиоволн определять дистанционно скорость движения транспортных средств?

- а) можно;
- б) можно лишь на расстояниях до 1 км;
- в) нельзя.

16. Какой дефект в изделиях из стеклопластиков более опасен в случаях циклического нагружения?

- а) воздушное включение;
- б) инородное включение;
- в) расслоение.

17. Каким методом лучше контролировать вибрации ОК на расстоянии двух метров?

- а) акустическим (УЗ);
- б) радиоволновым;
- в) радиационным.

18. В каком случае модуль коэффициента отражения от плоского диэлектрического слоя больше?

- а) в случае четвертьволнового (по толщине) слоя;
- б) в случае полуволнового слоя;
- в) в промежуточном случае.

19. Как уменьшить отражение от границы плоского диэлектрического слоя?

- а) введением дополнительного четвертьволнового слоя;
- б) введением дополнительного полуволнового слоя;
- в) введением дополнительного слоя с промежуточным значением толщины.

20. Согласование волноводных элементов тракта СВЧ-преобразователей считается очень хорошим, если:

- а) $K_{СВ} \sim 2,5$;
- б) $1,5 < K_{СВ} < 2,5$;
- в) $K_{СВ} \leq 1,02$.

21. Какая СВЧ-антенна относится к классу антенн бегущей волны?

- а) открытый конец волновода;
- б) рупорная антенна;
- в) эллиптическая антенна;
- г) диэлектрическая (стержневая) антенна.

22. Какая СВЧ-антенна является фокусирующей?

- а) гиперболическая;
- б) рупорная;
- в) диэлектрическая (стержневая).

23. Какая СВЧ-антенна имеет меньшую площадь раскрыва?

- а) с узкой диаграммой направленности;
- б) с широкой диаграммой направленности;
- в) с эллиптической поляризацией и узкой диаграммой направленности.

24. Какой тип СВЧ-генератора является полупроводниковым?

- а) магнетрон;
- б) лампа обратной волны;
- в) генератор Ганна.

25. Какой основной тип волны в прямоугольном волноводе?

- а) волна H_{01} ;
- б) волна H_{10} ;
- в) волна H_{11} ;
- г) волна H_{20} .

26. Какой режим волны в волноводе обеспечивает полную передачу энергии от СВЧ-генератора к нагрузке (антенне)?

- а) режим бегущей волны;
- б) режим стоячей волны;
- в) смешанный режим.

27. Что можно использовать для развязки СВЧ-генератора с нагрузкой (антенной), если имеются следующие волноводные элементы:

- а) короткозамыкающий поршень;
- б) фазовращатель;
- в) аттенюатор;
- г) волноводная нагрузка.

28. Какой волноводный элемент из перечисленных ниже может выполнять роль СВЧ-моста?

- а) волноводный Т-образный ответвитель типа Е;
- б) волноводный Т-образный ответвитель типа Н;
- в) направленный ответвитель;
- г) двойной волноводный тройник.

29. Что является непосредственным приемником радиоволн СВЧ из перечисленных элементов?

- а) вентиль на эффекте Фарадея;
- б) кольцевой волноводный мост;
- в) детекторная секция;
- г) турникетное волноводное соединение.

30. Можно ли амплитудным радиоволновым методом измерять толщину металлических пленок?

- а) нельзя;
- б) можно, но толщиной свыше 100 мкм;
- в) можно, но толщиной меньше 1 мкм.

31. Какое условие необходимо для осуществления непрерывного бесконтактного измерения толщины металлической ленты радиоволновым фазовым методом?

- а) односторонний доступ к ОК;
- б) двухсторонний доступ к ОК;
- в) использование волн круговой поляризации;
- г) использование длинноволновой части СВЧ-диапазона.

32. Амплитудно-фазовый метод применяется для контроля изменений толщины изделий из диэлектриков. От чего зависит однозначность результатов измерений?

- а) от рабочей длины волны СВЧ-генератора;
- б) от величины диэлектрической проницаемости материала слоя на длине волны СВЧ-генератора;
- в) от двух указанных выше факторов вместе (т.е. от длины волны в материале);
- г) от мощности СВЧ-генератора.

33. Амплитудно-фазовый радиоволновый метод используется:

- а) только для измерения толщины и влажности;
- б) только для дефектоскопии и структуроскопии;
- в) только для контроля вибрации;
- г) для решения любых задач в области НК и Д.

34. Можно ли при использовании амплитудно-фазового метода исключить влияние изменения зазора между антенной СВЧ-преобразователя и ОК?

- а) можно, применяя опорный элемент (ролик);
- б) можно, только при использовании линейно поляризованных волн;
- в) нельзя.

35. Применяя геометрический метод, возможно измерить толщину диэлектрического слоя при неизвестном значении диэлектрической проницаемости материала слоя. Каким образом:

- а) импульсной модуляцией непрерывного СВЧ-излучения;
- б) использованием двух разных углов падения радиоволнового пучка на диэлектрический слой;
- в) применением диэлектрических (стрелневых) антенн.

36. Что чаще всего применяют для повышения точности контроля толщины геометрическим методом?

- а) сужение диаграмм направленности антенн;
- б) укорочение рабочей длины волны;
- в) введение согласующей пластины на переднюю границу диэлектрического слоя.

37. Можно ли с помощью метода переменной частоты (частотно-фазового метода) измерить толщину диэлектрического слоя при неизвестном значении диэлектрической проницаемости материала?

- а) нельзя;
- б) можно, если использовать две разности частот;
- в) можно, если применить первую разность частот для диэлектрического слоя с искомой толщиной, а вторую разность частот для диэлектрического слоя из того же материала с известной толщиной.

38. Можно ли использовать для толщинометрии тонких пленок метод радиоволновой эллипсометрии?

- а) да, для любых пленок;
- б) да, но только для тонких металлических пленок;
- в) да, но только для тонких диэлектрических пленок;
- г) нет, невозможно.

39. Как проявляется автодинный эффект при контроле параметров ОК?

- а) в изменении мощности СВЧ-генератора;
- б) в изменении тока СВЧ-генератора;
- в) в изменении напряжения питания СВЧ-генератора.

40. Какой из перечисленных радиоволновых методов наиболее предпочтителен для НК многослойных диэлектрических конструкций?

- а) одночастотный метод;
- б) геометрический метод;
- в) амплитудно-фазовый метод;
- г) многочастотный метод.

41. Если необходимо определить толщину и диэлектрическую проницаемость каждого слоя трехслойной конструкции, то какое минимальное количество частот следует использовать?

- а) 3 частоты;
- б) 6 и более частот;
- в) 5 частот.

42. Измерительная волноводная линия используется:

- а) только для измерения длины волны (частоты) СВЧ-генератора;
- б) только для измерения параметров отраженных сигналов;
- в) только для измерения диэлектрических свойств диэлектриков;
- г) для любых перечисленных выше измерений.

43. Каков критерий локальности дефекта при радиоволновом методе НК?

- а) в классическом измерении размеров с помощью известных мер длины;
- б) в сравнении с рабочей длиной волны СВЧ-преобразователя;
- в) в сравнении с размерами раскрыва антенн СВЧ-преобразователя.

44. В амплитудно-фазовом дефектоскопе на отражение перед началом работы производится, как правило, балансировка мостовой схемы. Чем?

- а) изменением величины зазора между преобразователем и ОК;
- б) регулировкой вентиля;
- в) регулировкой элементов опорного плеча.

45. Каковы основные преимущества амплитудно-фазовых дифференциальных дефектоскопов, работающих в режиме на отражение?

- а) независимость от изменений зазора;
- б) независимость от изменений толщины;
- в) независимость от изменений среднего значения диэлектрической проницаемости материала ОК;
- г) независимость от изменений всех перечисленных факторов одновременно.

46. При каком уровне развязки плеч E и H двойного волноводного тройника амплитудно-фазовых дефектоскопов достижимо обнаружение расслоений с раскрывом 0,05 мм?

- а) 30 дБ;
- б) 40 дБ;
- в) 60 дБ.

47. Применение какого метода дефектоскопии перспективно для контроля технологической анизотропии и внутренних остаточных напряжений в диэлектрических ОК?

- а) амплитудно-фазового;
- б) поляризационного;
- в) геометрического.

48. Какова глубина контроля в дефектоскопах при использовании метода поверхностных волн?

- а) до 0,5 мм;
- б) соизмерима с рабочей длиной волны;
- в) порядка 10 рабочих длин волн.

49. Выявляемость дефектов в дефектоскопах поверхностных волн зависит от их ориентации. Какие дефекты будут выявляться более эффективно?

- а) ориентированные параллельно поверхности слоев;
- б) ориентированные нормально направлению распространения поверхностных волн;
- в) ориентированные произвольно.

50. Автоматическая калибровка в дефектоскопах поверхностных волн осуществляется через управление:

- а) частотой СВЧ-генератора;
- б) выходной мощностью СВЧ-генератора;
- в) выходным сигналом СВЧ-преобразователя на свободное пространство.

51. При проникновении наклонно падающего радиоволнового пучка из более плотной среды в менее плотную среду происходит:

- а) изменение частоты отраженного пучка;
- б) смещение максимума отраженного пучка;
- в) изменение направления распространения отраженного пучка.

52. При контроле гомогенности резиновых смесей амплитудно-фазовым методом используется металлическое основание для:

- а) укладки образцов;
- б) для формирования отраженного сигнала;
- в) для повышения чувствительности амплитудно-фазового метода;
- г) для решения всех перечисленных задач одновременно.

53. Какой параметр является корреляционным при контроле вязкости полимерных материалов процесса отверждения, содержания компонентов и т.п.?

- а) диэлектрическая проницаемость материалов;
- б) амплитуда сигнала;
- в) фаза сигнала;
- г) частота сигнала.

54. Какой зависимостью можно выразить изменение диэлектрической проницаемости смеси при увлажнении сухой среды?

- а) выражением частотной зависимости диэлектрической проницаемости для сухой среды;
- б) выражением частотной зависимости диэлектрической проницаемости для воды;
- в) выражением концентрационной зависимости диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси.

55. Зависимость $\text{tg}\delta$ воды от частоты электромагнитного поля имеет максимум в СВЧ-диапазоне радиоволн. От чего еще зависит положение максимума потерь?

- а) от температуры воды (только);
- б) от химического состава воды (только);
- в) от загрязнения воды;
- г) от всех факторов одновременно.

56. Каким образом устраняют неоднозначности результатов измерения влажности диэлектрического слоя на металле?

- а) изменением фиксированной рабочей частоты (длины волны) СВЧ-преобразователя;
- б) изменением величины рабочего зазора между преобразователем и ОК;
- в) электрической перестройкой частоты СВЧ-генератора с измерением среднего значения информативного сигнала.

57. Каким методом можно определить скопление влаги в теплозащитном элементе конструкции?

- а) радиоволновым (только);
- б) нейтронным (только);
- в) емкостным (только);
- г) тепловым (только);
- д) любым из перечисленных выше методов.

58. Какая допустимая в соответствии с "Санитарными нормами..." величина плотности потока электромагнитной энергии при работе в течение всего рабочего дня (8 ч)?

- а) 100 мкВт/см²;
- б) 10 мкВт/см²;
- в) 1000 мкВт/см².

59. Чем можно существенно снизить общую энергетическую нагрузку на рабочем месте оператора?

- а) внесением экрана из оргстекла;
- б) внесением экрана из листа гетинакса;
- в) внесением экрана из саженаполненной резины.

60. Может ли плоский диэлектрический слой вызвать эффект фокусировки падающего пучка радиоволн?

- а) может, в любом случае;
- б) может, только в случае градиента показателя преломления по толщине слоя;
- в) не может.

61. Модуль коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от плоского диэлектрического слоя, расположенного на металлическом зеркале (основании), равен 1, если:

- а) диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon \leq 2$, $\text{tg}\delta \leq 0,01$, а толщина $h = \lambda_0/4$;
- б) $\epsilon \leq 10$, $\text{tg}\delta \leq 0,01$, а толщина $h = \lambda_0/2$;
- в) ϵ – любое реальное значение, $\text{tg}\delta = 0$, толщина слоя любая.

62. С помощью чего производилась первая визуализация радиоволновых изображений?

- а) с помощью фотопленки;
- б) на экране электронно-лучевой трубки;
- в) на термочувствительной пленке;
- г) на цветном мониторе.

63. Какое включение одинаковых размеров в диэлектрике при работе на отражение выявится надежнее?

- а) воздушное;
- б) металлическое;
- в) из другого диэлектрика.

64. В каком диэлектрике одинаковых размеров радиоволны затухают больше?

- а) однородном (гомогенном);
- б) с случайными дефектами, размеры которых значительно меньше рабочей длины волны дефектоскопа;
- в) с равномерным наполнением фракциями, размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны.

65. Как производится выбор рабочей длины волны (полосы частот) радиоволнового прибора для НК?

- а) только с учетом размеров возможных опасных дефектов;
- б) только с учетом потерь в материале диэлектрика (ОК);
- в) только с учетом диапазона толщин ОК;
- г) с учетом всех выше перечисленных факторов одновременно.

66. Какие дефекты, неоднородности структуры и текстуры не обнаруживаются (не выявляются) радиоволновым методом?

- а) не имеющие оптического контраста;
- б) не имеющие акустического контраста;
- в) не имеющие радиоволнового (электромагнитного) контраста или скачков (изменений) комплексной величины диэлектрической проницаемости по сравнению с основным материалом.

67. Какое условие однозначного измерения толщины плоского диэлектрического слоя при использовании радиоволновых методов: фазового или амплитудно-фазового?

- а) максимальная толщина меньше 5 мм;
- б) максимальная толщина не более четверти длины волны в диэлектрике;
- в) максимальная толщина не более четверти длины волны в свободном пространстве.

68. Как лучше настроить СВЧ-преобразователь на рабочую длину волны?

- а) с помощью стандартной измерительной линии;
- б) с помощью диэлектрического клина;
- в) с помощью набора диэлектрических образцов.

69. Можно ли настроить СВЧ-генератор на рабочую длину волны без волномера или измерительной линии, имея лишь минимум вспомогательных средств?

- а) нельзя;
- б) можно, с помощью металлической пластины (отражателя);
- в) можно, с помощью металлической пластины и линейки.

70. Для оценки пространственных характеристик СВЧ-преобразователя необходимо знать диаграмму направленности антенн, которую можно измерить, имея:

- а) измерительную антенну с индикатором;
- б) панорамный измеритель КСВ;
- в) измерительную антенну с индикатором и координатное устройство.

71. Какая методика контроля является более правильной?

- а) с проведением калибровки до проведения контрольных операций;
- б) с проведением калибровки до и после проведения контрольных операций;
- в) с проведением калибровки после проведения контрольных операций.

72. При каком минимальном количестве калибровочных образцов правомерно проведение калибровки радиоволновых толщиномеров?

- а) одном образце;
- б) двух образцах;
- в) трех образцах.

73. Скажется ли на результате контроля амплитудно-фазовым дифференциальным методом изменение мощности СВЧ-генератора?

- а) скажется, если разная электрическая длина плеч дифференциальной мостовой схемы;
- б) скажется, если разная геометрическая длина плеч;
- в) не скажется при асимметрии схемы.

74. Чем характеризуется размер несплошности типа трещин?

- а) глубиной;
- б) длиной;
- в) раскрытием;
- г) всеми перечисленными величинами.

75. Какую несплошность можно отнести к дефектам, возникающим при эксплуатации изделия?

- а) усталостные трещины;
- б) пористость;
- в) термическая трещина;
- г) риска.

76. С помощью каких дефектоскопов можно существенно повысить достоверность контроля?

- а) с помощью поляризационных дефектоскопов;
- б) с помощью комбинированных трехканальных дефектоскопов;
- в) с помощью амплитудно-фазового дефектоскопа с увеличенной чувствительностью.

77. Какое требование стандарта к радиоволновым дефектоскопам по минимальным размерам выявляемых расщелений (площадь × величину раскрытия)?

- а) $1 \text{ см}^2 \times 0,1 \text{ мм}$;
- б) $0,5 \text{ см}^2 \times 0,5 \text{ мм}$;
- в) $1 \text{ см}^2 \times 0,5 \text{ мм}$.

78. Какой объект контроля обладает наибольшей эффективной поверхностью рассеяния (для одного и того же средства обнаружения)?

- а) мотоцикл;
- б) автобус;
- в) автомобиль "Жигули".

79. Каким радиоволновым методом определяется дистанционно скорость движения транспортных средств?

- а) методом переменной частоты;
- б) амплитудным методом (по затуханию радиоволн);
- в) методом на эффекте Доплера.

80. Существуют ли ограничения по измеряемым частотам вибраций с помощью радиоволнового метода?

- а) не существуют;
- б) не более 1 кГц;
- в) не более 1 МГц.

81. Какой параметр является определяющим (создает наибольший контраст) для радиоволнового метода при увлажнении сухого материала?

- а) масса (изменение массы);
- б) плотность (изменение плотности на единицу объема);
- в) диэлектрическая проницаемость (изменение ϵ);
- г) тангенс угла потерь (изменение $\text{tg}\delta$).

82. В каких случаях краевой эффект будет проявляться в большей степени?

- а) когда вектор E линейно поляризованной электромагнитной волны перпендикулярен линии края ОК;
- б) когда вектор E параллелен краю ОК;
- в) когда вектор E под углом 45° по отношению к краю ОК;
- г) расположение вектора E не имеет значения.

83. При дефектоскопии поляризационным методом мешающим фактором оказывается значительный отраженный сигнал от передней границы ОК. Как лучше расположить приемную и передающую линейно поляризованные антенны для повышения чувствительности поляризационного метода?

- а) параллельно друг другу (векторы E параллельны);
- б) под углом 45° ;
- в) под углом 90° (векторы E взаимно перпендикулярны).

84. Как уменьшить влияние паразитной интерференции в межантенном пространстве проходного радиodefектоскопа, меняя положение плоского (листового) ОК?

а) смещая ОК в направлении к передающей антенне перпендикулярно к оптической оси излучения;

б) располагая ОК под углом 45° по отношению к оптической оси;

в) смещая ОК в направлении к приемной антенне перпендикулярно к оптической оси.

85. Можно ли проводить диагностику различных ОК, используя радиоволновый метод с реализацией его без СВЧ-генератора?

а) можно, если чувствительность приемника 10^{-6} Вт;

б) можно, если чувствительность приемника 10^{-9} Вт;

в) можно, если чувствительность приемника 10^{-16} Вт;

г) нельзя.

86. Какой дефект в радиоволновом контроле часто называют "фазовым" дефектом?

а) дефект, при взаимодействии с которым в большей степени меняется амплитуда полезного сигнала;

б) дефект, вызывающий главным образом изменение фазы (набег фазы) информативного сигнала;

в) дефект, вращающий поляризацию радиоволн.

87. Какой сигнал является информативным при геометрическом методе толщинометрии?

а) сигнал связи между антеннами;

б) сигнал, отраженный от передней границы ОК;

в) сигнал, отраженный от задней границы ОК.

88. Происходит ли ослабление радиоволнового сигнала на границе двух полубесконечных диэлектрических сред?

а) не происходит;

б) происходит частично;

в) происходит полностью.

89. Каким параметром (в соответствии со стандартом) характеризуется степень неоднородности материала ОК?

а) коэффициентом неоднородности;

б) диапазоном крайних значений диэлектрических параметров;

в) средним значением диэлектрического параметра с отклонением от него в процентах.

90. Какая операция является существенно важной (но не обязательной) при подготовке образцов влажности из сыпучих материалов?

а) измерение массы (объема);

б) сушка (прокаливание);

в) вибрационное уплотнение.

91. Производя спектральный анализ отраженных от ОК сигналов, можно ли идентифицировать типы дефектов?

а) можно, если ОК облучать короткими радиоимпульсами;

б) можно, если ОК облучать непрерывным излучением с узкой полосой частот;

в) нельзя.

92. Какой многоэлементный приемник для визуализации радиоизображений построен на реактивном принципе измерений?

а) многоэлементная плоскость – антенна с СВЧ-диодами;

б) многоэлементная панель с рупорами-антеннами;

в) фотоуправляемая полупроводниковая пластина (ФУПП).

93. Что такое динамический энергетический диапазон радиоволнового прибора НК?

- а) предельная чувствительность прибора в [Вт];
- б) максимальная излучаемая мощность СВЧ-генератора прибора в [Вт];
- в) отношение излучаемой мощности к чувствительности прибора в [дБ];
- г) разность между излучаемой и принимаемой мощностями.

94. Как увеличить динамический энергетический диапазон радиоволнового прибора НК?

- а) повысить излучаемую мощность, превысив допустимую плотность потока излучения;
- б) повысить КПД антенн, увеличив размеры раскрыва за счет ухудшения локальности контроля;
- в) повысить чувствительность прибора.

95. Какие схемы приема-усиления обладают большей чувствительностью?

- а) схемы прямого усиления (детекторные) с усилителем постоянного тока;
- б) схемы с синхронным детектированием;
- в) схемы прямого усиления с усилителем низкой частоты.

96. Как уменьшить влияние случайных помех?

- а) использовать корреляционный принцип обработки сигналов;
- б) произвести модуляцию только полезного сигнала;
- в) провести контроль на разных ОК.

97. Как лучше выявить и определить систематическую ошибку измерений?

- а) с использованием только одного контрольного образца;
- б) с использованием представительного количества контрольных образцов и статистической обработки измеренных результатов;
- в) с использованием двух контрольных образцов.

98. Можно ли проконтролировать параметры вибраций ОК за бетонной стеной?

- а) нельзя;
- б) можно, если в выбранном диапазоне радиоволн бетонная стена радиопрозрачна (уровень сигнала достаточен для его индикации);
- в) можно в любом случае.

99. Какой правильный критерий разграничения ближней зоны (зоны Френеля) и дальней зоны (зоны Фраунгофера) в антенной технике?

- а) расстояние от раскрыва $2D^2/\lambda$ (D – размер апертуры, λ – длина волны);
- б) $10D^2/\lambda$;
- в) $0,5\lambda$.

100. Можно ли измерить диаметр сверхтонкого металлического провода бесконтактным СВЧ-методом?

- а) нельзя;
- б) можно, амплитудным методом в свободном пространстве;
- в) можно, фазовым методом в свободном пространстве;
- г) можно, резонаторным методом.

**ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ПО
РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ****I уровень квалификации**

1. в	26. а	51. б	76. б
2. г	27. в	52. г	77. а
3. в	28. г	53. а	78. б
4. в	29. в	54. в	79. в
5. б	30. в	55. г	80. а
6. а	31. б	56. в	81. г
7. б	32. в	57. д	82. б
8. в	33. г	58. б	83. в
9. в	34. а	59. в	84. б
10. г	35. б	60. а	85. в
11. б	36. в	61. в	86. б
12. а	37. в	62. б	87. в
13. б	38. а	63. б	88. б
14. в	39. б	64. в	89. а
15. а	40. г	65. г	90. в
16. в	41. б	66. в	91. а
17. б	42. г	67. б	92. в
18. а	43. б	68. а	93. в
19. а	44. в	69. в	94. в
20. в	45. г	70. в	95. б
21. г	46. в	71. б	96. а
22. а	47. б	72. в	97. б
23. б	48. б	73. а	98. б
24. в	49. а	74. г	99. а
25. б	50. в	75. а	100. г

**РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ
ПО РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ****II уровень квалификации**

1. Что лежит в основе физической природы радиоволн?

- а) электромагнитные колебания, электромагнитное излучение;
- б) электрические колебания, переменные магнитные поля;
- в) механические колебания, упругие волны.

2. От каких сред, структур, материалов радиоволны отражаются в большей степени?

- а) от любых материальных сред (не имеют значения свойства);
- б) от металлических конструкций;
- в) от полупроводниковых структур;
- г) от диэлектрических сред.

3. Через какие ниже перечисленные среды пройдут радиоволны сверхвысоких частот (СВЧ)?

- а) слой морской воды толщиной 1 ... 10 км;
- б) стальные, алюминиевые, латунные листы толщиной 1 ... 5 мм;
- в) листы гетинакса, текстолита, оргстекла толщиной 3 ... 20 мм.

4. В какой области значений лежит скорость распространения радиоволн в вакууме и свободном пространстве?

- а) $(2,9 \dots 3,0)10^5$ км/с;
- б) $(2,0 \dots 5,0)10^2$ км/с;
- в) $(2,9 \dots 3,1)10^6$ км/с.

5. Для экранирования рабочего места, помещения необходимо использовать тонкопленочные и сетчатые проводящие материалы. Какие лучше?

- а) алюминий;
- б) вольфрам;
- в) медь;
- г) никром.

6. Каков диапазон радиоволн СВЧ?

- а) 10 м ... 1 м;
- б) 1 м ... 1 мм;
- в) 1 мм ... 1 мкм.

7. В каких видах НК используется одно- временно излучение на длине волны 1 мм?

- а) вихретоковом и радиоволновом;
- б) радиоволновом и оптическом;
- в) оптическом и радиационном.

8. Для создания источника когерентного монохроматического излучения необходимо осуществить:

- а) постоянство и единство частоты электромагнитного излучения;
- б) постоянство мощности излучения;
- в) широкий спектр излучения.

9. При каком условии не наблюдается отражение радиоволн от границы раздела двух сред?

- а) когда диэлектрические свойства отличаются лишь на 20 %;
- б) когда волновые сопротивления двух сред равны;
- в) когда диэлектрические свойства отличаются в 2 раза.

10. Чем в основном характеризуется идеальный диэлектрик?

- а) большой величиной диэлектрической проницаемости;
- б) равномерной плотностью;
- в) отсутствием градиента свойств;
- г) тангенс угла потерь равен 0 (минимален).

11. Чем отличаются параметры отраженных сигналов при наклонном падении радиоволн разных линейных поляризации на границу раздела двух сред?

- а) не отличаются;
- б) отличаются по амплитуде и фазе;
- в) отличаются только по фазе;
- г) отличаются только по амплитуде.

12. Можно ли с помощью радиоволновых методов осуществлять контроль?

- а) формы металлоизделий;
- б) дефектов в сварных соединениях стальных труб;
- в) внутренней структуры металлоизделий.

13. Применяют ли радиоволны СВЧ-диапазона для влагометрии зерна?

- а) нет, не применяют;
- б) да, применяют без ограничений;
- в) да, применяют, но с ограничениями.

14. Можно ли с помощью радиоволн круговой поляризации определять дистанционно скорость движения транспортных средств в потоке?

- а) можно, в любом случае;
- б) можно лишь на расстояниях до 1 км;
- в) нельзя.

15. Какой метод лучше выбрать для осуществления контроля и измерения параметров вибраций ОК на расстоянии более 1 м?

- а) радиационный;
- б) радиоволновой;
- в) ультразвуковой
- г) емкостной.

16. Величина отраженного сигнала от плоского диэлектрического слоя зависит от его толщины и определяется модулем коэффициента отражения. В каких случаях отраженный сигнал больше?

- а) в случае полуволнового (по толщине) слоя;
- б) в случае четвертьволнового слоя;
- в) в промежуточном случае.

17. Можно ли уменьшить отражение от границы плоского диэлектрического слоя и как?

- а) введением дополнительного четвертьволнового слоя;
- б) введением дополнительного полуволнового слоя;
- в) введением дополнительного слоя с промежуточным значением толщины.

18. Если радиоволновой пучок наклонно падает на границу раздела из более плотной среды в менее плотную, то что при этом будет наблюдаться?

- а) изменение частоты отраженного сигнала;
- б) изменение направления распространения отраженного пучка;
- в) смещение максимума отраженного пучка.

19. Какой параметр является корреляционным при решении задач по контролю вязкости полимерных материалов, процессов отверждения, гомогенизации, содержания компонентов и т.п.:

- а) амплитуда сигнала;
- б) фаза сигнала;
- в) частота сигнала;
- г) диэлектрическая проницаемость материалов.

20. При увлажнении сухой среды изменяются ее диэлектрические свойства. Какой зависимостью, в принципе, можно выразить изменение диэлектрической проницаемости?

- а) выражением концентрационной зависимости диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси;
- б) выражением частотной зависимости диэлектрической проницаемости для воды;
- в) выражением частотной зависимости диэлектрической проницаемости для сухого вещества.

21. От каких факторов изменяется положение максимума $\operatorname{tg}\delta$ воды в СВЧ-диапазоне радиоволн?

- а) от изменения химического состава воды;
- б) от температуры воды;
- в) от введения примесей (загрязнения) воды;
- г) от всех факторов одновременно.

22. Может ли плоский диэлектрический слой вызвать эффект фокусировки падающего на него перпендикулярно (нормально) пучка радиоволн?

- а) не может;
- б) может, в любом случае;
- в) может, только в случае градиента показателя преломления по толщине слоя.

23. Всегда ли модуль коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от плоского диэлектрического слоя на металлическом зеркале равен 1 или нет, например для случаев, когда:

- а) диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε – любое реальное значение $\text{tg}\delta = 0$, толщина слоя – любая;
- б) $\varepsilon \leq 10$, $\text{tg}\delta \leq 0,01$, толщина $h = \lambda/2$ (λ – длина волны в диэлектрике);
- в) $\varepsilon \leq 2$, $\text{tg}\delta \leq 0,01$, толщина $h = \lambda/4$.

24. Если затухание радиоволн в диэлектрике зависит от структуры материала, то в каком диэлектрике одинаковых размеров затухание больше?

- а) с случайными включениями, размеры которых значительно меньше рабочей длины волны;
- б) с равномерным наполнением фракциями, размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны;
- в) в однородном (гомогенном) диэлектрике.

25. Как производится выбор длины волны (или полосы частот) при разработке или работе с радиоволновым прибором для НК и Д?

- а) только с учетом потерь в материале диэлектрика (ОК);
- б) только с учетом диапазона толщин ОК;
- в) только с учетом возможности обнаружения опасных дефектов;
- г) с учетом всех выше перечисленных факторов одновременно.

26. Какие неоднородности структуры и текстуры, а также дефекты не выявляются любым радиоволновым методом?

- а) не имеющие акустического контраста;
- б) не имеющие радиоволнового (электромагнитного) контраста или скачков (изменений) комплексной величины диэлектрической проницаемости по сравнению с основным материалом;
- в) не имеющие оптического контраста.

27. Любые ли частоты вибраций можно определить радиоволновым (в СВЧ-диапазоне) методом?

- а) любые;
- б) не более 1 ... 10 кГц;
- в) не более 0,5 ... 1 МГц.

28. При увлажнении сухого вещества какой (из перечисленных) параметр создает наибольший контраст для радиоволнового метода контроля?

- а) диэлектрическая проницаемость (изменение ε);
- б) плотность (изменение плотности на единицу объема);
- в) тангенс угла потерь (изменение $\text{tg}\delta$);
- г) масса (изменение массы).

29. Зависит ли "краевой эффект" от расположения вектора E и когда он проявится больше?

- а) когда вектор E линейно поляризованной электромагнитной волны перпендикулярен линии края ОК;
- б) когда вектор E параллелен краю ОК;
- в) когда вектор E расположен под углом 45° по отношению к краю ОК;
- г) расположение вектора E не имеет значения.

30. Можно ли проводить НК и Д диэлектриков радиоволновым пассивным методом?

- а) нельзя;
- б) можно, если чувствительность приемника 10^{-6} Вт;
- в) можно, если чувствительность приемника 10^{-9} Вт;
- г) можно, если чувствительность приемника 10^{-16} Вт.

31. Происходит ли ослабление радиоволнового сигнала на границе двух полубесконечных идеальных диэлектрических сред?

- а) происходит, причем полностью;
- б) происходит частично, по закону геометрической оптики;
- в) не происходит никогда.

32. На каком уровне производится, как правило, согласование элементов волноводного тракта СВЧ-преобразователей?

- а) на уровне $K_{СВ} = 1,02$;
- б) на уровне $1,5 < K_{СВ} < 2,5$;
- в) на уровне $K_{СВ} \sim 2,0$.

33. Какая из перечисленных является антенной бегущей волны?

- а) открытый конец (срез) волновода;
- б) диэлектрическая антенна;
- в) эллиптическая антенна;
- г) рупорная антенна.

34. Назовите фокусирующую антенну:

- а) диэлектрическая стержневая;
- б) рупорная;
- в) гиперболическая.

35. Какая СВЧ-антенна имеет более узкую диаграмму направленности?

- а) с меньшей площадью раскрыва;
- б) с меньшей площадью раскрыва и с эллиптической поляризацией;
- в) с большей площадью раскрыва.

36. Какие типы СВЧ-генераторов являются полупроводниковыми и с меньшим напряжением питания?

- а) отражательный клистрон, магнетрон;
- б) ГЛПД;
- в) генератор Ганна;
- г) лампа обратной волны (ЛОВ).

37. Какой основной тип волны в прямоугольном волноводе, заполненном диэлектриком?

- а) H_{10} ;
- б) H_{01} ;
- в) H_{11} .

38. Чтобы обеспечить полную передачу энергии от СВЧ-генератора к нагрузке (антенне), необходимо осуществить:

- а) режим стоячей волны;
- б) режим бегущей волны;
- в) смешанный режим.

39. Какие волноводные элементы можно использовать для развязки СВЧ-генератора нагрузкой (антенной)?

- а) циркулятор, аттенуатор;
- б) фазовращатель, короткозамыкающий поршень;
- в) отражатель, волноводную нагрузку.

40. Какой СВЧ-элемент выполняет, чаще всего, роль моста?

- а) направленный ответвитель;
- б) двойной волноводный тройник;
- в) волноводный Т-образный ответвитель типа E ;
- г) волноводный Т-образный ответвитель типа H .

41. Какой из СВЧ-элементов является непосредственным приемником СВЧ-радиоволн?

- а) турникетное волноводное соединение;
- б) вентиль на эффекте Фарадея;
- в) детекторная секция;
- г) кольцевой волноводный мост.

42. Первая визуализация радиоволновых изображений производилась с помощью:

- а) электронно-лучевой трубки;
- б) на термочувствительной пленке, бумаге;
- в) на цветном мониторе.

43. Визуализация радиоизображений может производиться многоэлементными системами. Назовите многоэлементную систему на реактивном принципе измерений:

- а) многоэлементная плоскость-антенна с множеством СВЧ-диодов;
- б) фотоуправляемая полупроводниковая пластина (ФУПП);
- в) многоэлементная панель с рупорными-антеннами.

44. Какие распространенные схемы приема-усиления более чувствительны?

- а) схемы с синхронным детектированием;
- б) схемы прямого усиления (детекторные) с усилителем постоянного тока;
- в) схемы прямого усиления с усилителем низкой частоты.

45. Какова длина ближней зоны антенны СВЧ-преобразователя?

- а) расстояние от раскрыва $2D^2/\lambda$ (D – размер апертуры, λ – длина волны);
- б) $0,5D^2/\lambda$;
- в) $10D^2/\lambda$.

46. Что непосредственно измеряют при использовании амплитудного метода радиоволнового контроля?

- а) интенсивность, мощность информативного сигнала;
- б) амплитуду сигнала;
- в) плотность информационного потока (отраженного – прошедшего сигнала);
- г) направление прихода сигнала.

47. В каком диапазоне толщин используется амплитудный радиоволновой метод для толщинометрии металлических пленок?

- а) $0 \dots 1$ мкм;
- б) $1 \dots 100$ мкм;
- в) $0,1 \dots 1$ мм.

48. При каком условии может быть реализован радиоволновой фазовый метод для бесконтактной толщинометрии металлопроката (лент, полос, листов)?

- а) при использовании волн круговой поляризации;
- б) при использовании длинноволновой части СВЧ-диапазона радиоволн;
- в) при двухстороннем доступе к ОК;
- г) при одностороннем доступе к ОК.

49. Чем можно обеспечить однозначность измерений толщины диэлектриков амплитудно-фазовым методом?

- а) выбором рабочей длины волны СВЧ-генератора λ_0 ;
- б) выбором рабочей длины волны СВЧ-генератора с учетом величины диэлектрической проницаемости материала ОК;
- в) изменением мощности СВЧ-генератора.

50. Для решения каких практических задач можно применить амплитудно-фазовый радиоволновой метод?

- а) только для измерения параметров вибрации;
- б) только для дефекто- и структуроскопии;
- в) только для толщинометрии и влагометрии;
- г) для решения любых задач в области НК и Д.

51. Как исключить влияние зазора (между антенной СВЧ-преобразователя и ОК) при практическом использовании одноантенного амплитудно-фазового метода?

- а) только применяя линейно поляризованные волны;
- б) за счет автоматической регулировки уровня чувствительности;
- в) за счет введения опорного элемента (ролика).

52. За счет чего геометрический метод толщинометрии позволяет обеспечить измерение толщины диэлектрического слоя при неизвестной величине диэлектрической проницаемости материала диэлектрика?

- а) за счет применения стержневых диэлектрических антенн;
- б) за счет использования двух разных углов падения радиоволнового пучка;
- в) за счет амплитудной модуляции СВЧ-излучения.

53. Как более корректно повысить чувствительность и точность при контроле толщины геометрическим методом?

- а) введением согласующей диэлектрической пластины на переднюю границу слоя;
- б) укорочением рабочей длины волны;
- в) сужением диаграмм направленности антенн.

54. Можно ли с помощью частотно-фазового метода измерить толщину диэлектрического слоя при неизвестном значении диэлектрической проницаемости материала?

- а) нельзя;
- б) можно, если использовать две разности частот;
- в) можно, если применить первую разность частот для диэлектрического слоя известной толщиной, а вторую разность частот для диэлектрического слоя (из того же материала) с известной толщиной.

55. В каких случаях может быть использован метод радиоволновой эллипсометрии (предполагается контроль толщины)?

- а) только для контроля толщины тонких металлических пленок на диэлектрической основе;
- б) для любых тонких пленок;
- в) только для контроля толщины тонких диэлектрических пленок на металлической основе.

56. При контроле параметров ОК, например толщины, используется автодинный эффект. В чем при этом содержится полезная информация (первичный информативный параметр)?

- а) в изменении тока СВЧ-генератора;
- б) в изменении мощности СВЧ-генератора;
- в) в изменении напряжения питания СВЧ-генератора.

57. Для НК и Д многослойных диэлектрических конструкций (измерение толщины, определение свойств, обнаружение дефектов) могут использоваться различные физические методы. Какой метод радиоволнового вида (из перечисленных) Вы выберете?

- а) одночастотный (амплитудный);
- б) многочастотный;
- в) геометрический;
- г) амплитудно-фазовый.

58. Какое минимальное количество частот потребуется при реализации многочастотного метода спектрального анализа частотной зависимости коэффициента отражения, если необходимо определить толщину и диэлектрическую проницаемость каждого слоя трехслойной конструкции?

- а) две частоты;
- б) три частоты;
- в) более шести частот.

59. При выборе амплитудно-фазового дифференциального СВЧ-дефектоскопа, работающего в режиме отражения на две приемно-передающие антенны, какие преимущества Вы получите?

- а) независимость от изменений средней толщины;
- б) независимость от изменений среднего значения диэлектрической проницаемости материала ОК;
- в) независимость только от изменений зазора;
- г) независимость от изменений всех перечисленных факторов одновременно.

60. Какой радиоволновой метод, как правило, применяют для обнаружения и контроля технологической анизотропии и внутренних остаточных напряжений в ОК из керамики?

- а) амплитудный;
- б) амплитудно-фазовый;
- в) поляризационный
- г) геометрический

61. При использовании радиоволнового метода поверхностных волн Вы можете обнаружить дефекты на глубине:

- а) до 0,5 мм (не более);
- б) соизмеримой с рабочей длиной волны;
- в) до $10\lambda_0$.

62. Зависит ли выявляемость дефектов от их ориентации при использовании классического метода поверхностных волн, и если да, то какие дефекты выявятся более эффективно?

- а) не зависит;
- б) ориентированные параллельно поверхности слоев;
- в) ориентированные нормально направлению распространения поверхностных волн;
- г) ориентированные произвольно.

63. Каким методом следует обнаружить скопление влаги в элементах конструкции, содержащих водород?

- а) радиоволновым;
- б) нейтронным (только);
- в) любым из перечисленных.

64. Если скорость движения ОК является параметром его качества, то какой метод Вы выберете для его оценки?

- а) метод переменной частоты (частотно-фазовый);
- б) амплитудный метод (по затуханию радиоволн);
- в) метод на эффекте Доплера.

65. Какой сигнал прежде всего несет информацию о толщине в геометрическом методе?

- а) сигнал, отраженный от передней границы ОК;
- б) сигнал, отраженный от задней границы ОК;
- в) сигнал связи между антеннами.

66. Можно ли замерить бесконтактно и без доступа параметры вибраций ОК за преградой, например, бетонной стеной?

- а) можно, в любом случае;
- б) нельзя;
- в) можно, при условии правильного выбора динамического энергетического диапазона радиоволнового прибора – виброметра.

67. Каким методом измеряют бесконтактно диаметр сверхтонкого металлического провода?

- а) резонаторным СВЧ-методом;
- б) амплитудным методом в свободном пространстве;
- в) фазовым методом в свободном пространстве.

68. Для каких настроечных операций используется измерительная волноводная линия:

- а) только для измерения длины волны (частоты) СВЧ-генератора;
- б) только для измерения диэлектрических свойств диэлектриков;
- в) только для измерения параметров отраженных сигналов;
- г) для любых перечисленных операций.

69. Чем обычно производится балансировка мостовой схемы амплитудно-фазового радиоволнового прибора НК?

- а) регулировкой вентиля или циркулятора;
- б) регулировкой перестраиваемых элементов опорного плеча;
- в) регулировкой зазора между СВЧ-преобразователем и ОК.

70. Чувствительность мостовых схем на базе двойного волноводного тройника зависит существенным образом от уровня развязки плеч E и H . Какой уровень обеспечит выявление расслоений с раскрывом 0,05 мм в диэлектрике в трехсантиметровом диапазоне радиоволн?

- а) 30 дБ;
- б) 45 дБ;
- в) 60 дБ.

71. Общая настройка СВЧ-преобразователя на рабочую длину волны может быть выполнена различными путями. Какой путь корректнее?

- а) с помощью стандартной измерительной линии;
- б) с помощью диэлектрического клина;
- в) с помощью набора диэлектрических образцов.

72. Можно ли в первом приближении настроить СВЧ-генератор на рабочую длину волны без волномера, измерительной линии или другого специального оборудования?

- а) нельзя;
- б) можно, с помощью уголкового отражателя;
- в) можно, с помощью металлического зеркала и линейки.

73. Что необходимо иметь для снятия диаграммы направленности антенн СВЧ-преобразователей?

- а) измерительную антенну с индикатором;
- б) измерительную антенну с индикатором и координатным устройством;
- в) панорамный измеритель КСВ.

74. Какие типы дефектов в изделиях из стеклопластиков считаются наиболее опасными, особенно в случаях циклического нагружения?

- а) расслоение – непроклей;
- б) инородное включение;
- в) воздушное включение.

75. Как определяется критерий локальности дефекта в радиоволновом виде НК?

- а) путем сравнения размеров дефекта с классической мерой длины;
- б) путем сравнения размеров дефекта с рабочей длиной волны СВЧ-дефектоскопа;
- в) путем сравнения с размерами раскрыва антенн СВЧ-преобразователя.

76. Какое из перечисленных локальных включений одинаковых размеров выявится надежнее при работе в режиме на отражение?

- а) воздушное включение;
- б) диэлектрическое (инородное) включение;
- в) металлическое включение.

77. Чем характеризуется размер несплошности типа трещин?

- а) раскрытием;
- б) длиной;
- в) глубиной;
- г) всеми перечисленными параметрами.

78. Какую несплошность можно отнести к дефектам, возникающим при эксплуатации изделия и предупреждающих о возможной опасности разрушения?

- а) риску;
- б) пористость;
- в) усталостные трещины;
- г) термическую трещину.

79. Транспортные средства как объекты контроля качества характеризуются эффективной поверхностью рассеяния ЭПР. Какой объект контроля обладает наибольшей ЭПР?

- а) автобус (городской);
- б) автомобиль ВАЗ-2101 ("Жигули");
- в) мотоцикл.

80. Могут ли быть в изделиях из диэлектриков "фазовые" дефекты; если да, то в чем это проявляется?

а) дефект, при взаимодействии с которым в большей степени меняется амплитуда полезного сигнала;

б) дефект, вызывающий главным образом изменение фазы (набег фазы) информативного сигнала;

в) дефект, вызывающий изменение поляризации радиоволн.

81. Часто (например, в дефектоскопах поверхностных волн) осуществляется автоматическая калибровка. Что при этом предпочтительнее стабилизировать?

а) выходную мощность СВЧ-генератора;

б) частоту СВЧ-генератора;

в) чувствительность СВЧ-приемника;

г) выходной сигнал СВЧ-преобразователя на свободное пространство.

82. Амплитудно-фазовый метод часто используется для контроля гомогенности смесей. Для чего используется металлическое основание (зеркало) при контроле гомогенности образцов резиновых смесей?

а) для укладки образцов (сырой резины);

б) для формирования отраженного сигнала;

в) для повышения чувствительности амплитудно-фазового метода;

г) для выполнения сразу всех выше перечисленных функций.

83. При контроле влажности диэлектрических слоев на металлической основе серьезными мешающими факторами являются изменение толщины и зазора. Что следует осуществить для резкого снижения их влияния?

а) изменить фиксированную длину волны (частоту) СВЧ-преобразователя;

б) изменить величину рабочего зазора между преобразователем и поверхностью ОК;

в) ввести электрически управляемую перестройку частоты СВЧ-генератора с измерением среднего значения информативного сигнала.

84. Какое методическое условие однозначности измерения толщины фазовым методом следует помнить и учитывать перед выбором средств измерений?

а) максимальная толщина диэлектрического слоя – не более 5 мм;

б) максимальная измеряемая толщина должна быть не более $\lambda/4$ (λ – длина волны в диэлектрике);

в) максимальная толщина – не более λ_0 (λ_0 – длина волны в свободном пространстве).

85. Какую методику контроля следует выбрать?

а) с проведением калибровки до проведения контрольных операций;

б) с проведением калибровки после проведения контрольных операций;

в) с проведением калибровки до и после проведения контрольных операций.

86. Правомерно ли проведение калибровки радиоволнового толщиномера с использованием только:

а) одного образца;

б) двух образцов;

в) трех образцов.

87. С помощью какого дефектоскопа следует проводить диагностику стеклопластикового обтекателя, если на первое место ставится достоверность контроля?

а) с помощью комбинированного из трех разных методов трехканального дефектоскопа;

б) с помощью поляризационного дефектоскопа;

в) с помощью амплитудно-фазового дефектоскопа с опорным плечом;

г) с помощью амплитудно-фазового дифференциального дефектоскопа.

88. Как лучше расположить передающую и приемную антенны линейно поляризованных волн (относительно друг друга), чтобы повысить чувствительность поляризационного метода?

- а) под углом 90° (векторы E взаимно перпендикулярны);
- б) под углом 45° ;
- в) параллельно друг другу (векторы E параллельны).

89. Можно ли положением плоского ОК в межантенном пространстве проходного радиодефектоскопа уменьшить влияние паразитной интерференции?

- а) нельзя;
- б) можно, располагая ОК под углом 45° по отношению к оптической оси антенн;
- в) можно, смещая ОК в направлении к любой антенне перпендикулярно оптической оси.

90. Следует ли при подготовке образцов влажности из сыпучих материалов проводить:

- а) измерение массы (объема);
- б) вибрационное (или иное) уплотнение;
- в) сушку (прокаливание) перед увлажнением до требуемого значения;
- г) все технологические операции.

91. Назовите способ уменьшения влияния случайных помех:

- а) способ корреляционной обработки сигналов;
- б) способ модуляции только полезного сигнала;
- в) проведение контроля на разных ОК.

92. Систематическую ошибку измерений можно выявить:

- а) с использованием только одного контрольного образца;
- б) с использованием двух контрольных образцов;

в) с использованием представительного количества контрольных образцов и статистической обработки измерительных результатов.

93. Какая плотность потока электромагнитной энергии допускается в соответствии с "Санитарными нормами..." при работе в течение всего рабочего дня (8 ч) на рабочем месте оператора-дефектоскописта?

- а) не более 100 мкВт/см^2 ;
- б) не более 10 мкВт/см^2 ;
- в) не более 1000 мкВт/см .

94. Каким экраном можно в большей степени снизить общую энергетическую нагрузку на месте работы оператора?

- а) экраном из саженаполненной резины;
- б) экраном из листа гетинакса;
- в) экраном из оргстекла.

95. Дайте физическое определение понятию "динамический энергетический диапазон" радиоволнового прибора НК и Д:

- а) предельная чувствительность прибора в Вт;
- б) максимальная излучаемая мощность СВЧ-генератора прибора в Вт;
- в) отношение излучаемой мощности к чувствительности прибора в дБ;
- г) разность между излучаемой и принимаемой мощностями.

96. Какими путями (без нарушений норм и ухудшения дефектоскопических параметров) можно увеличить динамический энергетический диапазон радиодефектоскопа?

- а) повысить излучаемую мощность;
- б) повысить чувствительность прибора;
- в) повысить КПД антенн, увеличив размеры раскрыва.

97. Укажите среди написанных ниже размеров расслоений (площадь \times величина раскрыва) значение, соответствующее требованиям стандарта на радиоволновые приборы (дефектоскопы – минимальный размер выявляемых расслоений):

- а) $1 \text{ см}^2 \times 0,1 \text{ мм}$;
- б) $0,5 \text{ см}^2 \times 0,5 \text{ мм}$;
- в) $1 \text{ см}^2 \times 0,5 \text{ мм}$.

98. Каким параметром в соответствии со стандартом характеризуют неоднородность материала ОК?

- а) коэффициентом неоднородности;
- б) диапазоном крайних значений диэлектрических параметров материала;
- в) средним значением диэлектрического параметра с отклонением от него в процентах.

99. Дайте правильную интерпретацию влияния на результат контроля изменений мощности СВЧ-генератора при работе с амплитудно-фазовым дифференциальным радиодефектоскопом с двумя антеннами:

- а) изменения повлияют на результат при разной электрической длине плеч дифференциальной мостовой схемы;
- б) изменения повлияют на результат при разной геометрической длине плеч;
- в) изменения не повлияют на результат при асимметрии схемы.

100. Можно ли идентифицировать типы дефектов, если произвести спектральный анализ отраженных от ОК сигналов?

- а) нельзя;
- б) можно, если ОК облучать непрерывным монохроматическим излучением;
- в) можно, если ОК облучать широким спектром частот.

**ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ПО
РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ****II уровень квалификации**

1. а	26. б	51. в	76. в
2. б	27. а	52. б	77. г
3. в	28. в	53. а	78. в
4. а	29. б	54. в	79. а
5. в	30. г	55. б	80. б
6. б	31. б	56. а	81. г
7. б	32. а	57. б	82. в
8. а	33. б	58. в	83. в
9. б	34. в	59. г	84. б
10. г	35. в	60. в	85. в
11. б	36. в	61. б	86. в
12. а	37. а	62. б	87. а
13. в	38. б	63. а	88. а
14. а	39. а	64. в	89. б
15. б	40. б	65. б	90. г
16. б	41. в	66. в	91. а
17. а	42. а	67. а	92. в
18. в	43. б	68. г	93. б
19. г	44. а	69. б	94. а
20. а	45. а	70. в	95. в
21. г	46. б	71. а	96. б
22. б	47. а	72. в	97. а
23. а	48. в	73. б	98. а
24. б	49. б	74. а	99. а
25. г	50. г	75. б	100. в

**РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ
ПО РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ**

III уровень квалификации

1. Природа радиоволн, физический смысл, математическое описание:

- а) механические колебания, упругие волны;
- б) электрические колебания, поля; переменные магнитные поля;
- в) электромагнитные колебания, волны, электромагнитное излучение, уравнение Максвелла.

2. От каких структур (материалов), не обладающих резонансными эффектами, радиоволны отражаются в меньшей степени?

- а) от любых диэлектрических структур (свойства не имеют значения);
- б) от металлических конструкций;
- в) от полупроводниковых структур;
- г) от диэлектрических структур с наименьшим значением диэлектрической проницаемости.

3. Через какие среды, перечисленные ниже, радиоволны сверхвысоких частот (СВЧ) не пройдут, произойдет их полное затухание?

- а) листы гетинакса, текстолита, стеклопластика, фторопласта, оргстекла, технического стекла, огнеупорной керамики толщиной 3 ... 50 мм;
- б) листы фольги стальной, алюминиевой, медной, латунной толщиной не более 1 мкм;
- в) слой морской воды толщиной порядка 1 км.

4. Экранирование помещений часто производят с использованием тонкопленочных и сетчатых проводящих материалов. Из каких материалов лучше и экономнее?

- а) медь;
- б) золото;
- в) нихром.

5. Отличается ли скорость распространения радиоволн в свободном пространстве от скорости распространения в диэлектрической слабо поглощающей среде?

- а) не отличается;
- б) отличается, увеличиваясь в $n = \sqrt{\varepsilon}$ раз (n – показатель преломления);
- в) отличается не более чем на 10 %.

6. Обозначьте ориентировочно границы диапазона радиоволн СВЧ. Назовите правильный ответ?

- а) 0,3 ... 300 ГГц;
- б) 1 кГц ... 100 ГГц;
- в) 300 ... 1000 ГГц.

7. В каких видах НК одновременно используется электромагнитное излучение с частотой 300 ГГц?

- а) вихретоковом и радиоволновом;
- б) оптическом и радиационном;
- в) радиоволновом и оптическом.

8. По каким законам распространяются радиоволны коротковолновой части СВЧ-диапазона?

- а) по законам геометрической оптики, в дальней зоне (зоне Фраунгофера);
- б) по законам геометрической оптики, в ближней зоне (зоне Френеля);
- в) по законам геометрической оптики, без ограничений.

9. Какие Вы знаете источники когерентного монохроматического излучения в СВЧ-диапазоне радиоволн?

- а) магнетрон;
- б) мазер;
- в) клистрон.

10. В каком случае отражение радиоволн от границы раздела двух сред сводится к минимуму?

- а) при равенстве волновых сопротивлений двух прилегающих сред;
- б) при отличии всего лишь на 20 ... 30 %;
- в) при отличии в 2 раза.

11. В чем заключается принципиальное отличие идеального диэлектрика от неидеального (несовершенного)?

- а) в величине диэлектрической проницаемости;
- б) в коэффициенте неоднородности материала диэлектрика;
- в) в отсутствии градиента свойств;
- г) в величине тангенса угла потерь.

12. При наклонном падении линейно поляризованных радиоволн на границу раздела двух сред (из менее плотной в более плотную) наблюдается случай, когда функция $r = f(\varphi)$ проходит через минимум (r – модуль коэффициента отражения, φ – угол падения). При какой линейной поляризации это имеет место?

- а) при горизонтальной (перпендикулярной) поляризации;
- б) при эллиптической поляризации;
- в) при вертикальной (параллельной) поляризации.

13. При каком угле падения на границу раздела двух сред (вторая среда более плотная) эллиптически поляризованная отраженная волна становится линейно поляризованной с горизонтальной поляризацией?

- а) угол падения $\varphi \sim 5^\circ$;
- б) угол падения $\varphi = \varphi_B$ (угол Брюстера);
- в) угол падения $\varphi = 85^\circ$.

14. Радиоволновые СВЧ-методы широко применяют для целей влагометрии. Можно ли и по какому признаку определить пороговый уровень связанной влаги?

- а) нет, нельзя;
- б) можно, используя только амплитудный метод;
- в) можно, используя дифференциальный амплитудный метод (по изменению, например, крутизны поглощения в увлажненном материале).

15. Можно ли с помощью СВЧ-радиоволн определять дистанционно скорость движения транспортных средств в потоке?

- а) можно, с использованием радиоволн круговой поляризации и селекции по скорости;
- б) можно в любом случае, но на расстояниях до 1 км;
- в) нельзя.

16. Какой метод целесообразнее выбрать для измерения параметров вибраций ОК, расположенного за диэлектрической преградой, без прямого доступа к нему?

- а) радиационный;
- б) радиоволновой;
- в) ультразвуковой;
- г) емкостной.

17. Какой толщине плоского диэлектрического слоя соответствует первое минимальное значение модуля коэффициента отражения?

- а) четвертьволновой;
- б) полуволновой;
- в) промежуточной.

18. Какой толщине дополнительного плоского диэлектрического слоя, расположенного на границе раздела двух диэлектрических сред, соответствует первое минимальное значение модуля коэффициента отражения?

- а) четвертьволновой;
- б) полуволновой;
- в) промежуточной.

19. При наклонном падении пучка на границу раздела из более плотной среды в менее плотную среду в области критического угла падения происходит:

- а) изменение частоты отраженного сигнала;
- б) изменение направления распространения отраженного пучка;
- в) смещение максимума отраженного пучка.

20. Какой общий физический параметр характеризует состояние и состав материала (вещества), используемый в дальнейшем для анализа первичных информативных параметров (амплитуды, фазы, поляризации, частоты) в процессе НК?

- а) температура;
- б) плотность;
- в) диэлектрическая проницаемость материалов.

21. Каким общим выражением можно описать изменение диэлектрической проницаемости в процессе увлажнения сухой среды?

- а) выражением концентрационной зависимости диэлектрической проницаемости для двухкомпонентной смеси;
- б) выражением для частотной зависимости ϵ воды;
- в) выражением для частотной зависимости ϵ сухого вещества.

22. Частота, соответствующая максимуму поглощения водой энергии радиоволн СВЧ, зависит от:

- а) температуры воды (только);
- б) химического состава;
- в) наличия примесей;
- г) от всех факторов одновременно.

23. Нормально падающий на плоский диэлектрический слой пучок радиоволн претерпевает эффект фокусировки. За счет чего?

- а) преломления боковых лучей;
- б) градиента показателя преломления по толщине слоя;
- в) изменений плотности.

24. При каких условиях модуль коэффициента отражения от диэлектрического слоя на металлическом зеркале равен единице?

- а) если падающая электромагнитная волна слабо сферическая, толщина $h = \lambda/2$ (λ – длина волны в диэлектрике);
- б) если падающая волна плоская, а $\text{tg}\delta = 0$ (тангенс угла потерь материала диэлектрика), ϵ – любое значение, h – любое значение;

в) если падающая волна плоская, $\text{tg}\delta = < 0,01$; $2 < \epsilon < 10$, $h = \lambda/4$.

25. Затухание радиоволн в диэлектрике зависит от структуры материала. Какой вид потерь характерен для неоднородных диэлектриков, в состав которых входят различные фракционные твердые наполнители?

- а) потери за счет интерференции;
- б) потери за счет дифракции;
- в) потери за счет поглощения – рассеяния.

26. В каких случаях выбор рабочей длины волны радиodefектоскопа производится только с учетом возможности обнаружения наиболее опасных дефектов?

- а) когда тангенс угла потерь материала ОК мал, толщина соизмерима с рабочей длиной волны (невелика), диэлектрик изотропный;
- б) когда толщина ОК и тангенс угла потерь велики;
- в) когда диэлектрик анизотропен и в состав входят многочисленные фракции.

27. Какой главный критерий выявляемости – невыявляемости дефектов?

- а) наличие акустического контраста;
- б) наличие радиоволнового контраста, скачка ϵ ;
- в) наличие оптического контраста.

28. Существуют ли ограничения по контролю частоты вибраций бесконтактным СВЧ-методом?

- а) не существуют;
- б) не более 10 кГц;
- в) не более 1 МГц.

29. В чем проявляется наибольший контраст для радиоволнового метода при увлажнении сухого материала?

- а) в величине ϵ ;
- б) в изменении плотности, массы;
- в) в величине $\text{tg}\delta$.

30. Когда "краевой эффект" проявляется в большей степени, если используются линейно поляризованные волны?

- а) когда вектор E параллелен линии края ОК;
- б) когда вектор E перпендикулярен линии края ОК;
- в) когда вектор E расположен под углом 45° по отношению к краю ОК;
- г) расположение вектора E не имеет значения.

31. Какое главное условие выбора и применения пассивного радиометода?

- а) невозможность использования даже слабого источника СВЧ-излучения;
- б) возможность оптимального решения задачи;
- в) наличие сверхчувствительного приемника ($S \geq 10^{-16}$ Вт).

32. Являются ли границы раздела сами по себе источником ослабления радиосигнала и по каким законам?

- а) да, являются, по случайным законам;
- б) нет, не являются;
- в) да, являются, по законам геометрической оптики.

33. Важно ли согласование волноводных элементов тракта СВЧ-преобразователей и до какого уровня?

- а) очень важно, причем до уровня $K_{СВ} \leq 1,02$;
- б) важно, но до уровня $1,2 < K_{СВ} < 1,5$;
- в) не имеет значения, можно до уровня $K_{СВ} \sim 5$.

34. Какие из перечисленных антенн не являются антеннами бегущей волны?

- а) открытый конец (срез) волновода;
- б) эллиптическая антенна;
- в) рупорная антенна;
- г) диэлектрическая антенна.

35. Какая антенна не является фокусирующей?

- а) эллиптическая;
- б) линзовая;
- в) диэлектрическая;
- г) гиперболическая;
- д) рупорно-линзовая.

36. Если СВЧ-антенна имеет узкую диаграмму направленности, то начальные размеры сечения пучка (у раскрыва):

- а) соизмеримы с длиной волны;
- б) значительно больше длины волны (несколько длин волн);
- в) меньше длины волны.

37. Выделите полупроводниковый СВЧ-генератор с низким напряжением питания:

- а) магнетрон;
- б) генератор Ганна;
- в) отражательный клистрон;
- г) ГЛПД;
- д) ЛОВ.

38. На каком типе волны в волноводе круглого сечения не имеет значения плотность контакта и даже зазор в сочленениях отдельных элементов?

- а) H_{01} ;
- б) H_{10} ;
- в) H_{11} .

39. Какой режим (с точки зрения КСВ) полностью не обеспечивает передачу энергии от СВЧ-генератора к нагрузке?

- а) режим бегущей волны;
- б) режим стоячей волны;
- в) смешанный режим.

40. Какие волноводные элементы обычно используют для улучшения развязки СВЧ-генератора с нагрузкой?

- а) направленный ответвитель;
- б) волноводная нагрузка;
- в) вентиль;
- г) аттенуатор.

41. Укажите волноводный элемент, который в зарубежной литературе именуется как "магическое" T:

- а) двойной волноводный тройник;
- б) волноводный T-образный ответвитель типа E ;
- в) волноводный T-образный ответвитель типа H ;
- г) короткозамыкающий подвижный поршень.

42. Укажите приемник СВЧ-радиоволн:

- а) вентиль (на эффекте Фарадея);
- б) детекторная головка;
- в) турникетное соединение;
- г) волноводный мост.

43. На чем производилась первая визуализация радиоизображения?

- а) на цветном мониторе;
- б) на термочувствительной бумаге;
- в) на жидкокристаллическом экране;
- г) на экране электронно-лучевой трубки;
- д) на фотопленке.

44. Назовите прототип многоэлементной системы приема и получения радиоизображения на основе реактивного принципа измерений и поляризационного анализа.

- а) многоэлементная решетка с СВЧ-диодами;
- б) многоэлементная решетка с рупорными антеннами;
- в) фотоуправляемая полупроводниковая пластина (ФУПП) с барабаном Вейлера.

45. Укажите более чувствительную схему приема СВЧ-сигналов:

- а) схема с синхронным детектированием;
- б) схема прямого усиления с усилителем постоянного тока;
- в) схема прямого усиления с усилителем низкой частоты.

46. Каков критерий по протяженности зоны Френеля для антенн радиодиапазона?

- а) длина ближней зоны порядка $0,5\lambda$;
- б) рассеяние от раскрыва до зоны Фраунгофера $2D^2/\lambda$ (где D – размер апертуры, λ – длина волны);
- в) расстояние до дальней зоны $10D^2/\lambda$.

47. Что является первичным информативным параметром при использовании амплитудных методов радиоволнового вида НК?

- а) амплитуда сигнала;
- б) мощность сигнала;
- в) частота сигнала (длина волны);
- г) поляризация сигнала.

48. Каким пределом по толщине ограничивается применение амплитудного метода для толщинометрии металлических пленок?

- а) толщиной 1 мм;
- б) толщиной 100 мкм;
- в) глубиной скин-слоя.

49. Фазовый радиоволновой метод применяют для толщинометрии металлопроката. Используется двухсторонний доступ. Контролируется, как правило, изменение толщины, разнотолщинность. Есть ли ограничение по средней толщине?

- а) ограничений нет;
- б) не более 5 мм;
- в) не более 50 мм.

50. Влияют ли рабочая длина волны и диэлектрическая проницаемость материала на однозначность измерений толщины диэлектриков амплитудно-фазовым методом?

- а) нет, не влияет;
- б) влияет, поэтому толщина $h_{\max} \leq \lambda/4$ (λ – длина волны в материале-диэлектрике);
- в) влияет, поэтому $h_{\max} \geq \lambda_0/4$ (λ_0 – длина волны в свободном пространстве).

51. Можно ли применять амплитудно-фазовый метод радиоволнового вида НК для решения (в первом подходе) любых задач?

- а) да, можно, с учетом ограничений согласно нормативной документации;
- б) только для толщинометрии и влагометрии;
- в) только для измерений параметров вибраций;
- г) только для проведения дефекто- и структуроскопии.

52. Можно ли конструктивно устранить влияние зазора в амплитудно-фазовом (одноантенном) методе при контроле динамических ОК?

- а) нельзя;
- б) только применяя линейно поляризованные волны;
- в) можно, за счет автоматической регулировки уровня (АРУ) чувствительности;
- г) можно, за счет введения (рядом с антенной) опорного элемента (ролика).

53. Как методически, используя геометрический метод, определить толщину плоского участка стены, не зная величины диэлектрической проницаемости материала ОК?

- а) за счет введения амплитудной модуляции СВЧ-излучения;
- б) за счет использования двух разных углов падения пучка радиоволн;
- в) за счет применения стержневых диэлектрических антенн.

54. При контроле толщины геометрическим методом чувствительность и точность снижаются из-за влияния мощного отраженного пучка от передней границы ОК. Как устранить влияние?

- а) укорочением рабочей длины волны;
- б) сужением диаграмм направленности антенн;
- в) введением на передней границе ОК дополнительного слоя с согласующими импедансы свойствами.

55. Какие (среди указанных) полные возможности метода радиоволновой эллипсометрии?

- а) контроль толщины и свойств любых тонких пленок;
- б) только контроль толщины тонких металлических пленок на диэлектрической основе;
- в) только контроль толщины и свойств тонких диэлектрических пленок на металлической основе.

56. Как использовать частотно-фазовый (переменной частоты) метод для измерения толщины диэлектрического слоя с неизвестным значением ϵ (диэлектрической проницаемости материала)?

- а) увеличить разность частот и провести второе измерение; решить два уравнения;
- б) уменьшить разность частот и провести второе измерение; решить два уравнения;
- в) сделать второе измерение на том же ОК, но с известным значением разности толщин; решить два уравнения.

57. Для решения задач по НК используются различные физические эффекты. Один из них использует зависимость тока генератора от изменения свойств нагрузки, например толщины пленки. Как называется эффект?

- а) автодинный эффект;
- б) эффект Ганна;
- в) эффект Баркгаузена.

58. Выберите (и обоснуйте) разнородный метод НК и Д многослойных диэлектрических конструкций, позволяющий проводить измерение толщины слоев, определение свойств, обнаружение дефектов (одновременно):

- а) амплитудно-фазовый метод;
- б) многочастотный (спектральный) метод;
- в) геометрический метод;
- г) амплитудный (одночастотный) метод.

59. Если использовать многочастотный метод спектрального анализа частотной зависимости коэффициента отражения для определения толщин и диэлектрических проницаемостей слоев трехслойной конструкции, то потребуется:

- а) две частоты;
- б) три частоты;
- в) более шести частот.

60. Какие преимущества дает амплитудно-фазовый дифференциальный СВЧ-дефектоскоп, работающий в режиме на отражение с двумя приемно-передающими антеннами?

- а) только независимость от изменений зазора;
- б) только независимость от изменений средней толщины;
- в) только независимость от изменений среднего значения ϵ ;
- г) независимость от всех факторов одновременно.

61. Можно ли обнаружить и каким методом технологическую анизотропию и, особенно, внутренние остаточные напряжения в ОК из керамики, огнеупоров, композиционных материалов и электрофарфора?

- а) геометрическим методом;
- б) поляризационным методом;
- в) амплитудным методом;
- г) амплитудно-фазовым методом.

62. Радиоволновой метод поверхностных волн при реальном применении позволяет обнаружить опасные дефекты – расслоения, непроклеи и др., на глубине:

- а) соизмеримой с рабочей длиной волны;
- б) до 0,5 мм, не более;
- в) до $10 \lambda_0$.

63. Какие типы дефектов можно выявить более эффективно, используя метод поверхностных волн?

- а) дефекты типа расслоений, непроклеев на глубине не более λ_0 , ориентированные параллельно поверхности;
- б) дефекты типа трещин, ориентированные перпендикулярно направлению распространения поверхностных волн;
- в) дефекты типа воздушных микропузырей, ориентированные произвольно.

64. В каком случае примеси водорода будут действовать в качестве мешающего фактора при влагометрии ОК?

- а) в случае использования теплового метода;
- б) в случае использования радиоволнового метода;
- в) в случае использования нейтронного метода.

65. Какой конкретно радиоволновой метод является оптимальным при диагностике транспортных средств с оценкой их скоростных режимов и селекцией по скорости?

- а) метод переменной частоты (частотно-фазовый);
- б) метод на использовании эффекта Доплера;
- в) метод по затуханию радиоволн (амплитудный).

66. В геометрическом методе информация о толщине ОК содержится в параметре l – расстоянии между двумя сигналами. Какой сигнал является информационным?

- а) отраженный от передней границы ОК;
- б) отраженный от задней границы ОК;
- в) сигнал связи.

67. На каком методе должен работать виброметр для оценки параметров вибраций ОК за преградой, например кирпичной стеной, если требуется бесконтактность измерений без доступа к изделию?

- а) на радиоволновом (например, доплеровском) методе;
- б) на оптическом методе;
- в) на радиационном методе.

68. Можно ли измерить диаметр сверхтонкого металлического провода в изоляции радиоволновым методом и каким?

- а) амплитудным методом в свободном пространстве;
- б) фазовым методом в свободном пространстве;
- в) резонаторным СВЧ-методом (например, с помощью полуоткрытого резонатора).

69. Какие измерительные операции можно проводить с помощью стандартной измерительной линии?

- а) только измерение коэффициента стоячей волны;
- б) только измерение амплитуды и фазы отраженных сигналов;
- в) только измерение диэлектрических свойств (волноводным методом);
- г) любые перечисленные операции.

70. Настройку и балансировку двойного волноводного тройника производят с помощью:

- а) вентиля и циркулятора;
- б) перестраиваемых элементов опорного плеча;
- в) направленного ответвителя.

71. До какого уровня развязки плеч E и H необходимо настроить двойной волноводный тройник, чтобы обнаружить расслоение в стеклопластике с раскрытием 0,05 мм (в трехсантиметровом диапазоне радиоволн)?

- а) до 25 дБ;

- б) до 50 дБ;
- в) до уровня не менее 60 дБ.

72. В чем принципиальные отличия построения СВЧ-томографа от радиационного (рентгеновского) томографа?

- а) в алгоритме обработки первичной информации;
- б) в системе сбора первичной полезной информации и алгоритме ее обработки;
- в) в сканирующей системе.

73. Если необходимо проверить настройку СВЧ-генератора радиоволнового преобразователя, не имея волномера (частотомера), измерительной линии или другого специального оборудования, то можно использовать:

- а) металлическое зеркало (отражатель) с микрометрической головкой;
- б) приемную измерительную антенну;
- в) уголкового отражатель.

74. Для оценки пространственных характеристик СВЧ-преобразователей снимают диаграммы направленности используемых антенн. Каким инструментом и как это осуществляется?

- а) измерительной антенной с индикатором, в плоскости E ;
- б) измерительной антенной с индикатором и координатным устройством, в плоскостях E и H ;
- в) панорамным измерителем КСВ, в плоскости H .

75. Назовите типы дефектов, свойственные и наиболее опасные для стеклопластиковых изделий и конструкций, особенно в случае циклического нагружения или знакопеременных деформаций:

- а) воздушное включение;
- б) инородное (например, диэлектрическое) включение;
- в) расслоение, непроклеи;
- г) изменение плотности-пористости.

76. Каким образом сделать заключение о принадлежности дефекта к понятиям "локальный" или "протяженный". С чем сравнить (в радиоволновом виде НК)?

- а) с размерами раскрыва антенн (сечения пучка) СВЧ-преобразователя;
- б) с классической мерой длины (м);
- в) с рабочей длиной волны СВЧ-прибора;
- г) с длиной волны в материале ОК.

77. Локальное включение (одинаковых размеров) при работе на отражение вывится надежнее, если оно:

- а) металлическое (любой материал);
- б) диэлектрическое (любой материал), но слабый контраст;
- в) диэлектрическое (любой материал), но большой контраст;
- г) воздушное.

78. Несплошность типа трещины характеризуется:

- а) только длиной;
- б) раскрытием;
- в) глубиной;
- г) всеми перечисленными параметрами.

79. Какой опасный дефект можно отнести к последствиям нарушения режима термической обработки при изготовлении керамических и огнеупорных изделий?

- а) усадочная раковина;
- б) внутренние остаточные напряжения;
- в) пористость;
- г) риска.

80. Как проявляются "фазовые" дефекты с точки зрения радиоволновых методов?

- а) вызывают главным образом изменение фазы (набег фазы) информативного сигнала;
- б) вызывают изменение поляризации радиоволн;
- в) изменяют частоту информативного сигнала.

81. Транспортные средства, как объект радиоволнового контроля качества, имеют разную эффективную поверхность рассеяния. Как в реальном потоке транспортных средств определить скорость движения ОК с минимальной ЭПР (на фоне больших ЭПР)?

- а) ввести электронное сканирование узким лучом;
- б) ввести автоматическую регулировку чувствительности;
- в) ввести селекцию по скорости.

82. Для повышения эксплуатационных и метрологических характеристик радиоволновых приборов НК и Д последние дополняются схемами автокалибровки. При этом, как правило, компенсируются все основные источники временных, тепловых и других нестабильностей. В каких условиях предпочтительнее режим автокалибровки?

- а) в безэховой камере;
- б) в рабочих условиях на свободное пространство;
- в) в рабочих условиях на образце;
- г) в рабочих условиях на специально выбранном участке ОК.

83. Можно ли амплитудно-фазовым дифференциальным методом (с двумя антеннами в СВЧ-преобразователе) надежно определить протяженные дефекты в плоских диэлектрических ОК?

- а) нельзя;
- б) можно;
- в) можно, но только края дефекта (эффект двух локальных дефектов).

84. Можно ли обнаруживать наличие влаги в теплозащитных покрытиях летательных аппаратов, если меняются толщина и рабочий зазор?

- а) нельзя;
- б) можно, если электрически перестраивать частоту СВЧ-генератора, а измерять среднее значение информативного сигнала;
- в) можно, но только при очень большом влагонасыщении.

85. Вы выбрали радиоволновой толщиномер на фазовом методе: рабочая длина волны $\lambda_0 = 12$ см, диэлектрическая проницаемость материала ОК $\varepsilon = 4$. Какова максимальная толщина однозначного отсчета?

- а) 10 мм;
- б) 15 мм;
- в) 30 мм.

86. Какое методическое указание более правильное, если в выбранном приборе отсутствует режим автокалибровки?

- а)... провести калибровку на образцах до проведения контрольных операций;
- б)... провести калибровку на образцах после проведения контрольных операций
- в)... провести калибровку до и после проведения контрольных операций.

87. Какое минимальное количество образцов необходимо и достаточно для проведения калибровки радиоволновых толщиномеров?

- а) 3 образца;
- б) 1 образец;
- в) 20 образцов.

88. Как уменьшить связь антенн поляризационного дефектоскопа через переднюю поверхность ОК?

- а) расположением приемной антенны под углом 90° по отношению к передающей антенне;
- б) смещением приемной антенны по горизонтали;
- в) смещением приемной антенны по вертикали.

89. Для чего появились комбинированные СВЧ-приборы (например, трехканальный дефектоскоп с использованием поляризационного, амплитудно-фазового с опорным плечом и амплитудно-фазового дифференциального методов)?

- а) для выявления локальных дефектов;

- б) для повышения достоверности и надежности контроля;

- в) для повышения чувствительности к дефектам.

90. Какие практические задачи решаются в первую очередь с применением радиоголографического метода?

- а) обнаружение различных (локальных, протяженных, структурных) дефектов в дорогостоящих ОК;

- б) выявление поверхностных микротрещин;

- в) регистрация последствий деформаций и структурных изменений (напряженно-деформированного состояния).

91. При экспресс-контроле влажности сыпучих материалов и калибровке проводятся операции обязательного и рекомендательного характера. Назовите рекомендательную операцию.

- а) измерение массы;

- б) уплотнение (насыпное, вибрационное, прессовое, шнековое);

- в) сушка перед увлажнением до требуемого значения.

92. Чтобы снизить (устранить) влияние случайных помех, необходимо использовать:

- а) корреляционную обработку сигнала;

- б) амплитудную модуляцию полезного сигнала;

- в) частотную модуляцию информативного сигнала.

93. Как выявить систематическую ошибку измерений?

- а) с использованием только одного контрольного образца, проводя многократные измерения;

- б) с использованием двух-трех контрольных образцов;

- в) с использованием представительного количества контрольных аттестованных образцов и статистической обработки и оценки измеренных результатов.

94. Если на рабочем месте оператора плотность потока электромагнитной энергии составляет 1000 мкВт/см^2 , то в течение какого времени разрешается работать с прибором в соответствии с "Санитарными нормами..."?

- а) 15 мин;
- б) 2ч;
- в) 8 ч.

95. Чтобы в большей степени снизить общую энергетическую нагрузку в зоне нахождения оператора, необходимо применить экран из:

- а) саженаполненной резины;
- б) тонкой медной сетки, впрессованной в саженаполненную резину;
- в) тонкой медной сетки, впрессованной в саженаполненную резину с регулярными рассеивающими выступами.

96. Чтобы увеличить "динамический энергетический диапазон" радиоволнового прибора НК и Д, необходимо поднять:

- а) чувствительность прибора;
- б) отношение излучаемой мощности к чувствительности прибора;
- в) излучаемую мощность СВЧ-генератора прибора;
- г) КПД антенн.

97. В стандарте на приборы радиоволнового вида неразрушающего контроля, в разделе "дефектоскопы", указаны минимальные размеры выявляемых расслоений. Назовите размер минимального расслоения, соответствующий стандарту:

- а) $2 \text{ см}^2 \times 0,1 \text{ мм}$;
- б) $1 \text{ см}^2 \times 0,1 \text{ мм}$;
- в) $0,5 \text{ см}^2 \times 0,5 \text{ мм}$;
- г) $0,5 \text{ см}^2 \times 0,2 \text{ мм}$.

98. Выявляемость дефектов зависит от степени общей неоднородности материала ОК. Каким параметром согласно стандарту на термины и определения характеризуют неоднородность материала ОК?

- а) отклонением (в процентах) крайних значений диэлектрического параметра к его среднему значению;
- б) диапазоном крайних значений диэлектрического параметра материала ОК;
- в) коэффициентом неоднородности диэлектрического материала.

99. В каких случаях можно не только выявлять, но и различать, т.е. идентифицировать различные типы дефектов?

- а) если ОК облучать широким спектром частот и производить спектральный анализ коэффициента отражения (прохождения);
- б) если ОК облучать широким спектром частот и производить интегральную оценку коэффициента отражения (прохождения);
- в) если ОК облучать непрерывным монохроматическим излучением и производить регистрацию сигнала только в случае резонансного эффекта.

100. При использовании дифференциальных мостовых схем с двумя рабочими каналами (антеннами) изменение мощности СВЧ-генератора теоретически не должно влиять на результаты контроля. Если геометрическая и, самое главное, электрическая длина рабочих плеч одинакова, то в чем причина практического влияния изменений мощности (дайте Вашу интерпретацию)?

- а) в паразитном излучении в сочленениях и приеме детекторной головкой;
- б) в недостаточной развязке плеч E и H моста (основной части схемы);
- в) в отсутствии оптимальной связи СВЧ-генератора с нагрузкой (мостовой схемой);
- г) в наличии интерференции в межантенном пространстве радиоволнового прибора.

**ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ПО
РАДИОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ****III уровень квалификации**

1. в	26. а	51. а	76. г
2. г	27. б	52. г	77. а
3. в	28. а	53. б	78. г
4. а	29. в	54. в	79. б
5. б	30. а	55. а	80. а
6. а	31. б	56. в	81. в
7. в	32. в	57. а	82. б
8. а	33. а	58. б	83. а
9. б	34. а-в	59. в	84. б
10. а	35. в	60. г	85. б
11. г	36. б	61. б	86. в
12. в	37. б	62. а	87. а
13. б	38. а	63. а	88. а
14. в	39. б	64. в	89. б
15. а	40. в, г	65. б	90. в
16. б	41. а	66. б	91. б
17. б	42. б	67. а	92. а
18. а	43. г, д	68. в	93. в
19. в	44. в	69. г	94. а
20. в	45. а	70. б	95. в
21. а	46. б	71. в	96. б
22. г	47. а	72. б	97. б
23. а	48. в	73. а	98. в
24. б	49. а	74. б	99. а
25. в	50. б	75. в	100. б

1. **Неразрушающий** контроль: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, С.В. Румянцев и др./ Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2001. 616 с.
2. **Неразрушающий** контроль и диагностика. Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
3. **Неразрушающий** контроль. В 5 кн. Контроль излучением. Кн. 4: Практическое пособие / Б.Н. Епифанцев, Е.А. Гусев, В.И. Матвеев, Ф.Р. Соснин / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1992. 321 с.
4. **Оптическая** и СВЧ-дефектоскопия. Л.Г. Дубицкий, А.А. Кеткович, В.И. Матвеев, В.Г. Слоущ. М.: Машиностроение, 1981. 52 с.
5. **Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
6. **Конев В.А., Любецкий Н.В., Тиханович С.А.** Радиоволновая эллипсометрия диэлектрических структур. Минск: Наука и техника, 1989. 133 с.
7. **Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е.** Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск: Изд-во Томского университета, 1985. 214 с.
8. **Гаврилин В.В., Григулис Ю.К., Пориньш В.М.** Электромагнитные радиоволновые приборы для контроля слоев полупроводниковых и металлических структур. Рига: Зинатне, 1982. 162 с.
9. **Борулько В.Ф., Дробахин О.О., Славин И.В.** Многочастотные СВЧ неразрушающие методы измерения параметров слоистых диэлектриков. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1982. 120 с.
10. **Потапов А.И., Игнатов В.М., Александров Ю.Б.** Технологический неразрушающий контроль пластмасс. Л.: Химия, 1979. 288 с.
11. **Воробьев Е.А.** Экранирование СВЧ-конструкций. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
12. **Харвей А.Ф.** Техника СВЧ. В 2-х т. М.: Сов. радио, 1965. 783 с.
13. **Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П.** Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967. 651 с.
14. **Дубицкий Л.Г.** Радиотехнические методы контроля изделий. М.: Mashгиз, 1963. 351 с.
15. **Хилд М., Уортон С.** Микроволновая диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1968. 390 с.
16. **ГОСТ 25313–82.** Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения.
17. **ГОСТ 23480–79.** Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования.
18. **ГОСТ 26170–84.** Контроль неразрушающий. Приборы радиоволновые. Общие технические требования.
19. **ГОСТ 26680–85.** Контроль неразрушающий. Дефектоскопы радиоволновые. Общие технические требования.
20. **Дж. Роберт Лайнбек.** СВЧ-томограф // Электроника, 1983. № 22. С. 6–7.
21. **Холодов Ю.А.** Мозг в электромагнитных полях. М.: Наука, 1982. 123 с.

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Неразрушающий контроль

Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН
В.В. КЛЮЕВА

Том 6

В.В. Клюев, В.Ф. Мужижкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Книга 1

В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Книга 2

В.И. Матвеев

РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

Книга 3

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.2001

Редакторы: *Н.А. Фетисова, Е.Д. Макаренко, О.Н. Лутовина*

Переплет художника *Т.Н. Погореловой*

Корректоры: *М.Я. Барская, Е.В. Сабынич*

Инженер по компьютерному

моделированию: *Г.Ю. Корабельникова*

Сдано в набор 12.04.04. Подписано в печать 18.10.04. Формат 70×100/16

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная

Усл. печ. л. 67,6. Уч.-изд. л. 70,12.

Тираж 1030 экз. Заказ № 10976

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Оригинал-макет изготовлен в ООО "Издательство "Машиностроение-1"

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ДЛЯ ЗАМЕТОК
