

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Институт металлургии, машиностроения и транспорта
Кафедра технологии и исследования материалов

Паромов Владимир Викторович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по курсу

«Пластическая обработка металлов»

Санкт-Петербург
2013 г.

Содержание

	Стр.
Лекция 1	5
Введение. Пластическая деформация и её роль в промышленной обработке металлов	5
Определение ОМД, упругой и пластической деформации	6
Гл.1. Способы ОМД	8
1.1. Прокатка	9
1.1.1. Продольная прокатка	9
1.1.2. Поперечная прокатка	10
1.1.3. Поперечно – винтовая прокатка	10
1.2. Волочение	11
1.3. Прессование	11
1.4. Ковка и штамповка	12
1.5. Роль прокатки в ОМД	13
Гл.2. Теоретические основы пластической деформации	15
2.1. Кристаллические решётки металлов и дефекты кристаллического строения	15
2.1.1. Кристаллическое строение металлов	15
2.1.2. Индексация плоскостей и направлений в кристаллической решётке	18
2.1.3. Дефекты кристаллического строения	20
Лекция 2.	22
2.2. Механизмы пластической деформации	25
2.2.1. Системы скольжения дислокаций	25
2.2.2. Пластическая деформация и поворот решётки при сдвиге по системам скольжения	26
2.2.3. Двойникование	27
2.3. Напряжённое состояние в точке тела	28
2.3.1. Тензор напряжений	28
2.3.2. Главные напряжения и главные направления	29
2.4. Величины, характеризующие деформированное состояние в точке тела	31
2.4.1. Перемещения, деформации , тензор деформаций	31
2.4.2. Главные деформации . Схемы главных деформаций	33
Лекция 3	34
2.5. Условия текучести	34

2.5.1. Условие начала пластической деформации монокристалла	34
2.5.2. Условие начала пластической деформации поликристалла	35
2.5.3. Условие пластичности Треска – Сен-Венана	36
2.5.4. Условие пластичности Губера – Мизеса	36
2.6. Обобщённые напряжение и деформация. Связь между напряжениями и деформациями	36
2.7. Трение при ОМД	37
2.7.1. Сухое трение	37
2.7.2. Жидкостное трение	38
2.7.3. Граничное трение	38
2.7.4. Смазки	39
2.7.5. Влияние трения на НДС	40
Лекция 4	41
2.8. Пластичность и разрушение металлов при ОМД	41
2.9. Давление обрабатываемого металла на инструмент и работа деформации	44
Гл.3. Теоретические основы продольной прокатки	46
3.1. Основные понятия и определения продольной прокатки	46
3.1.1. Длина очага деформации	46
3.1.2. Показатели деформации	47
3.1.3. Условие захвата металла валками	47
Лекция 5	48
3.2. Кинематические условия процесса прокатки	48
3.2.1. Деление очага деформации на зоны	48
3.2.2. Формы очага деформации	49
3.2.3. Нейтральный угол	50
3.2.4. опережение и отставание	52
3.3. Уширение при прокатке	53
3.3.1. Зависимость уширения от условий прокатки	55

Лекция 6	56
3.4. Сила и давление металла на валки	56
3.5. Момент и мощность прокатки	60
Гл.4. Сортамент прокатной продукции	63
4.1. Сортовая сталь	65
4.2. Плоский прокат	66
4.3. Трубы	67
4.4. Прочие виды проката	68
Лекция 7	69
Гл.5. Оборудование прокатных станов	69
5.1. Виды технологических операций, выполняемых на прокатных станах	69
5.2. Основное и вспомогательное оборудование прокатных станов	70
5.2.1. Главная линия прокатного стана	70
5.2.2. Рабочая клеть	70
5.2.3. Вспомогательное оборудование	74
5.3. Типы прокатных станов	75
Лекция 8	79
Гл.6. Волочение металлов	79
6.1. Волочительные станы	80
6.2. Основные технологические операции при волочении	82
Гл.7. Производство труб	83
7.1. Бесшовные трубы	83
7.2. Сварные трубы	84
Гл.8. Прессование металлов	86
Гл.9. Ковочно – штамповочное производство	89
Рекомендуемая литература	90

Лекция 1

Введение. Пластическая деформация и её роль в промышленной обработке металлов.

Хорошо известно, что развитие цивилизации во многом определяется уровнем производства металлов. В их производстве широко используется способность пластически деформироваться без разрушения до больших степеней деформации.

Знание закономерностей обработки металлов давлением помогает выбирать наиболее оптимальные режимы технологических процессов, требуемое основное и вспомогательное оборудование и технически грамотно его эксплуатировать.

Использование металлов человеком началось в глубокой древности (более пяти тысячелетий до н. э.). Вначале находили применение **цветные металлы** (медь, сплавы меди, золото, серебро, олово, свинец и др.), позднее начали применять **черные** — железо и сплавы на его основе. Длительное время производство металлов носило примитивный характер и по объему было весьма незначительным. Однако **в конце XIX в. мировая выплавка стали резко возросла с 0,5 млн. т в 1870 г. до 28 млн, т в 1900 г.** Еще в большем объеме растет металлургическая промышленность **в XX столетии** (только в СССР производилось 140 млн.т чугуна в год).

Металлургическое производство на заводах с полным циклом подразделяется на **две основные стадии:**

- **на первой** получают металл заданного химического состава (выплавка, разливка в слитки).
- **на второй стадии** металлу придают ту или иную необходимую форму при практически неизменном химическом составе обрабатываемого материала различными способами (обработкой металлов давлением (**ОМД**), литьём в формы, обработкой резанием, химической или электрохимической размерной обработкой).
- Существенные преимущества методов ОМД по сравнению с другими методами придания формы привели к их широкому распространению. В настоящее время около **90%** выплавляемой стали обрабатывают **методами ОМД.**

К этим **преимуществам** относятся:

- значительное уменьшение отходов;
- повышение производительности труда;
- высокая точность обработки;
- повышение свойств в процессе обработки и другие

преимущества.

Например, недостаточное развитие обработки давлением в **1955 г. в СССР** приводило к отправке **в стружку 4,5 млн. тонн металла в год**. Потери металла на окисление при транспортировке и переплавке стружки (угар, окисление) достигало **3 млн.т в год**.

Определение ОМД, упругой и пластической деформации

Под ОМД понимают технологические процессы формоизменения за счёт пластической деформации в результате воздействия на деформируемое тело внешних сил без разрушения металла (которое происходит, например, при обработке резанием).

Различают упругую и пластическую деформации.

Если **при упругих деформациях** тело полностью восстанавливает форму и размеры после разгрузки, то при пластической деформации после разгрузки сохраняются изменения формы и размеров, полученные под действием внешних сил.

При **пластических деформациях** атомы смещаются друг относительно друга на расстояния, большие межатомных, и меняют своих соседей. После разгрузки они не возвращаются на свои места.

При **упругой деформации** смещения атомов обычно небольшие и после разгрузки они возвращаются на свои места, не меняя соседей.

При пластической деформации есть всегда **сопутствующая ей упругая деформация**, которая снимается при разгрузке (вспомните диаграмму растяжения и путь разгрузки на ней). По этой причине говорят об **упруго-пластической деформации** при ОМД.

Поскольку данный курс предназначен для металлургов – не специалистов в области ОМД, встаёт вопрос: **зачем вам изучать теорию, оборудование и технологию ОМД?**

Причин этому несколько.

- **Во-первых**, специалисты одной специальности на заводе часто контактируют со специалистами других специальностей, решая различные производственные вопросы. И **для их взаимопонимания они должны знать смежные специальности** в необходимом объёме. Например, специалисты по ОМД глубоко изучают металловедение, литьё, сварку, выплавку металлов.

- **Во-вторых**, качество выпускаемой заводом продукции определяется всеми этапами производства и, например, литейщик должен понимать, как повлияют дефекты металла, полученные на стадии литья, на его качество после ОМД.

- **В-третьих**, с элементами теории или технологии ОМД в своей практике приходится сталкиваться **каждому специалисту** на металлургическом заводе.

Металлурги при разливке металла в слитки сталкиваются с различными видами напряжений в металле и форме. От них зависит структура металла, влияющая на деформируемость при ОМД.

У **литейщиков** напряжения в металле и форме могут приводить к короблению и образованию трещин и знание теории напряжений и деформаций позволяет заранее рассчитать напряжения. Кроме того, в настоящее время широко применяются *совмещённые методы литья-прокатки* (бесслитковая прокатка), *литья под давлением* и др.

Сварщики применяют сварку давлением, сварку взрывом; сваривают заготовки перед прокаткой и от качества шва зависит деформируемость металла.

Металловедение ОМД – это вообще самостоятельный обширный раздел металловедения. Структура и свойства деформированного металла, которыми занимаются **металловеды**, зависят от условий деформирования, исходной структуры металла, вида деформирования.

Нанесением защитных и иных покрытий на металл занимаются **физхимики**. Они же ведают вопросами влияния смазки на процесс деформирования, занимаются термодинамикой процессов ОМД.

Порошковики используют ОМД для формовки изделий из порошков, их обработки после спекания.

- **В-четвёртых**, нередки случаи работы специалистов в смежных специальностях: металлург работает сварщиком, прокатчик – термистом и т.п.

Кроме того, карьерный рост приводит специалиста на **руководящие должности** (в руководстве цехом, отделом завода, заводом), требующие знаний во всех областях знаний, представленных в организации.

Глава 1. Способы обработки металлов давлением

Способность металлов принимать значительную пластическую деформацию в горячем и холодном состоянии широко используется в технике. При этом изменение формы тела осуществляется преимущественно с помощью давящего на металл инструмента. Поэтому получение изделий таким способом называют **обработкой металлов давлением (ОМД) или пластической обработкой металлов (ПОМ)**.

Обработка металлов давлением представляет собой **последний технологический передел** металлургического производства. При этом обеспечивается не только **придание** слитку или заготовке необходимой **формы и размеров**, но совместно с другими видами обработки **существенно улучшаются** механические и другие **свойства** металлов.

Прокатка, волочение, прессование, ковка, штамповка представляют собой различные виды обработки металлов давлением в пластическом состоянии, применяемые на металлургическом заводе. Наиболее производительным способом является **прокатка**.

Исторически первой возникла ручная **ковка** (между молотом и наковальней) – 4 тыс.лет до н.э.

Следующим процессом стало **волочение** (3 тыс.лет до н.э.), затем **прокатка** (упоминание о ней впервые встречается у Леонардо да Винчи в 1495 г., но применялась она значительно раньше).

Штамповка возникла в 17 веке и **прессование** – в 1894г.

1.1. Прокатка

Прокатка металлов является таким видом пластической обработки, когда исходная заготовка обжимается вращающимися валками **прокатного стана** в целях уменьшения поперечного сечения заготовки и придания ей заданной формы. Существует **три основных способа прокатки: продольная, поперечная и поперечно-винтовая** (или косая).

1.1.1. Продольная прокатка

При **продольной** прокатке (рис. 1) деформирование **заготовки** 2 осуществляется между вращающимися в разные стороны **валками** 1 и 3. Так как валки непосредственно контактируют с металлом, они являются инструментом. Валки могут быть цилиндрической формы с гладкой поверхностью («**гладкой бочкой**») (прокатка слитков, листов, полос, лент, фольг) или **профилированные**. В последнем случае нарезается канавка по окружности валка (**ручей**), заполнение которой металлом при прокатке позволяет получить **сортовые профили** с различным поперечным сечением (уголок, круг, квадрат, швеллер и др.). Таким же способом получают **рельсы**.

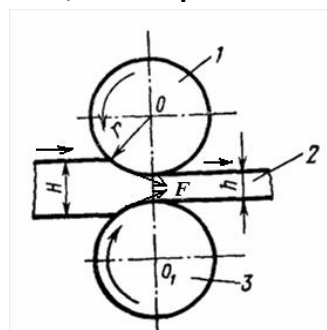


Рис. 1. Схема продольной прокатки

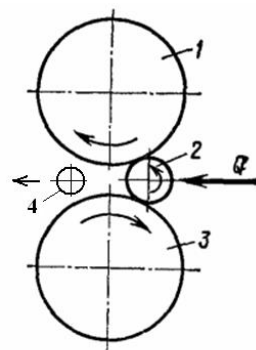


Рис. 2. Схема поперечной прокатки

1.1.2. Поперечная прокатка

Из простейшей схемы **поперечной прокатки** (рис. 2) видно, что оси **прокатных валков** 1 и 3 и обрабатываемой **заготовки** 2 параллельны. Оба валка вращаются в одном направлении, а заготовка круглого сечения — в противоположном.

В процессе *поперечной* прокатки обрабатываемая **заготовка** удерживается в валках с помощью специального приспособления (**линейки**). Обжатие заготовки по диаметру и придание ей требуемой формы сечения обеспечиваются соответствующей профилировкой валков и изменением расстояния между ними. Данным способом производят изделия, представляющие собой **тела вращения** (шары, оси, шестерни и пр.).

1.1.3. Поперечно-винтовая прокатка

Поперечно-винтовая или косая прокатка выполняется во вращающихся в одном направлении **валках 1 и 3**, установленных в прокатной клети под некоторым углом друг к другу (рис. 3) (оси валков на виде сверху образуют угол в несколько градусов). Валки имеют бочковидную форму.

Станы косой прокатки используют при производстве бесшовных труб, главным образом для прошивки слитка или заготовки в гильзу. В момент соприкосновения металла 2 с вращающимися валками, имеющими наклон оси к оси обрабатываемой заготовки, возникают **силы**, направленные вдоль оси заготовки, и **силы**, направленные по касательной к ее поперечному сечению. Совместное действие этих сил обеспечивает **вращение и втягивание** обрабатываемой заготовки в суживающуюся щель и **деформирование**.

Перед носиком **оправки** 5 возникают растягивающие напряжения, облегчающие внедрение оправки в металл и его **прошивку**.

Длина **гильзы** 4 определяется длиной штанги 6, удерживающей оправку.

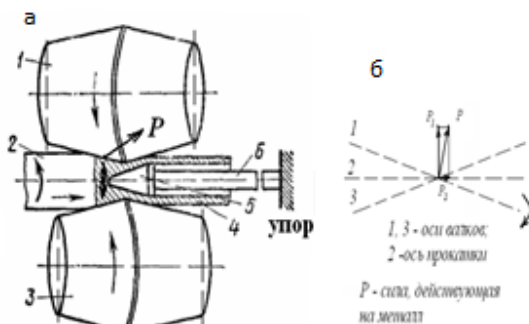


Рис. 3. Схема кривой (винтовой) прокатки
а - вид сверху;

1 — правый валок; 2 — заготовка; 3 — левый валок; 4 — гильза, б — оправка; б — штанга (стержень)

б - вид сбоку на оси валков и прокатки

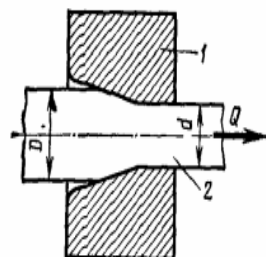


Рис. 4. Схема процесса волочения

1.2. Волочение

Волочение металла (рис. 4) — это протягивание изделия 2 круглого или фасонного профиля через конусное отверстие волочительного очка 1 (**волоку, фильеру**), площадь выходного сечения которого меньше площади сечения исходного изделия.

Волочение выполняется тяговым усилием Q , приложенным к переднему концу обрабатываемой заготовки с помощью захвата - **клещей**.

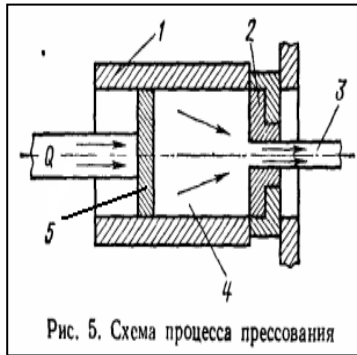
Данным способом получают **проволоку** всех видов, прутки с высокой точностью поперечных размеров и трубы разнообразных сечений (волочением на оправке или без неё).

Толстую проволоку (**катанку**) получают продольной прокаткой.

1.3. Прессование

Прессование металла (рис. 5) — это вытеснение с помощью **пуансона** 5 металла исходной **заготовки** 4 (чаще всего цилиндрической формы), помещенной в **контейнер** 1, через отверстие **матрицы** 2. При этом выходящий конец 3 заготовки получает сечение, соответствующее контуру отверстия в матрице.

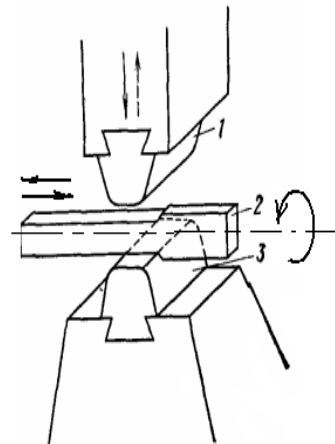
Прессованием получают разнообразный сортамент профилей — **прутки и трубы** из цветных и черных металлов.



1.4. Ковка и штамповка

Ковка и штамповка металла включают такие процессы получения изделий, как ковка, объемная горячая и холодная штамповка и штамповка листового и пруткового материала в холодном состоянии. При машинной ковке и штамповке применяются машины **молоты и прессы** с усилием деформирования **до 16 тыс.т.**

При **ковке** (рис. 6) деформирование **заготовки 2** осуществляется с помощью универсального подкладного инструмента или **бойков 1 и 3**. Бойки чаще всего бывают **плоскими**, однако применяют **вырезные** и закругленные бойки. Нижний боек обычно неподвижен, верхний совершает возвратно-поступательное движение. В результате многократного и непрерывного воздействия инструмента и **поворота с перемещением заготовки** она постепенно приобретает необходимую форму и размеры.



Штамповка подразделяется на объёмную и листовую.

При **объёмной штамповке** придание заготовке заданной формы и размеров осуществляется путем заполнения металлом **рабочей полости 3 штампа 1, 2** (рис.7). При этом может образоваться **заусенец 4** (облой), подлежащий удалению.

Листовая штамповка является таким видом пластической обработки металла, когда для получения деталей типа **колпачков 4** (рис. 8), втулок и других в качестве исходного материала используют **лист** или ленту. Обработка выполняется без значительного изменения толщины заготовки.

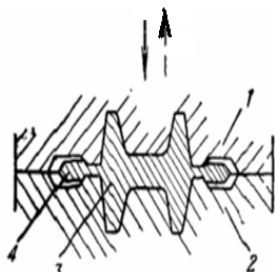


Рис. 7. Схема штамповки:
1 – верхняя часть штампа; 2 – нижняя часть штампа; 3 – изделие; 4 – облой (заусенец)

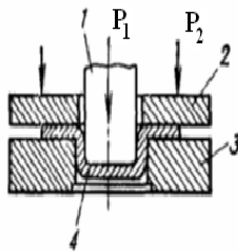


Рис. 8. Схема листовой штамповки колпачка:
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – изделие

1.5. Роль прокатки в обработке давлением

Среди различных методов пластической обработки **прокатка** занимает особое положение, поскольку данным способом производят **изделия**, пригодные для **непосредственного использования** (в состоянии поставки) в строительстве и машиностроении (шпунт, рельсы, профили сельскохозяйственного машиностроения и пр.).

Прокаткой получают также **разнообразные виды заготовок**, которые являются исходным материалом для других способов обработки. Так, горячекатаная и холоднокатаная **листовая сталь**, полосы и ленты в больших количествах идут **для листовой штамповки**.

При ковке в штампах в качестве исходного продукта также используют преимущественно катаную заготовку. Исходным материалом **при волочении** является **катанка**, получаемая прокаткой на проволочных станах.

Огромное значение прокатного производства в народном хозяйстве подтверждается ежегодным увеличением выпуска проката. Через валки **прокатных** станов проходит **75. . .80% всего выплаваемого** металла.

Получают дальнейшее развитие и **новые методы** ОМД: **холодная высадка, холодная объемная штамповка, калибровка, выдавливание, раскатка, обкатка и др.**

Глава 2. Теоретические основы пластической деформации

Производство изделий из металлов и сплавов **пластической обработкой** основывается на развитии **теории обработки металлов давлением**, являющейся научной базой разработки технологических операций получения изделий из металлов и сплавов.

Теория **ОМД** позволяет :

- оценить **экономическую целесообразность** принятого способа деформации,
- выявить **влияние** условий обработки на **свойства** получаемых изделий,
- определить **силовые и энергетические параметры процесса** и указать пути их рационального изменения,
- дает возможность управлять процессом обработки с точки зрения **улучшения способности металлов пластически деформироваться**.
- знание закономерностей обработки металлов давлением помогает выбирать наиболее **оптимальные режимы** технологических процессов, требуемое основное и вспомогательное оборудование и технически грамотно его эксплуатировать.

2.1. Кристаллические решётки металлов и дефекты кристаллического строения

2.1.1. Кристаллическое строение металлов.

Понятие кристаллической решетки. Типы решёток. Силы связи атомов.

Металлы являются кристаллическими телами. **Кристаллические вещества** характеризуются тем, что составляющие их атомы расположены в определенном порядке, образуя пространственную решетку из повторяющихся геометрически правильных **объемных ячеек**.

Пример кристаллической решетки показан на рис.1. Наименьшая часть кристаллической решетки, определяющая всю систему строения вещества, называется элементарной ячейкой (ячейкой Бравэ).

На рис. 2 показаны различные способы выбора элементарной ячейки в плоской решётке. Кристаллическая решетка komponуется из любого типа показанных элементарных ячеек. Однако, для удобства расчетов предпочтительно использовать **элементарную ячейку**, выбранную в **прямоугольной системе координат**.

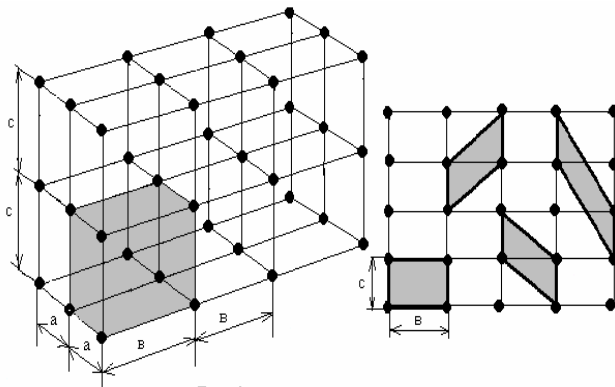


Рис.1

Рис.2

Типы кристаллических решёток металлов

Кристаллические решетки разных веществ различаются по форме и размерам элементарных ячеек. Для большинства металлов характерны **три типа** кристаллических решеток (из 14 возможных) (рис. 3) с ячейками:

ОЦК (α -Fe, Mo, W) (в),

ГЦК (γ -Fe, Cu, Al) (б) и

ГПУ (Mg, Ti, Be) (а).

Некоторым твердым телам, в том числе и металлам, свойственны не одна, а две или более кристаллические структуры, устойчивые при различных температурах и давлениях.

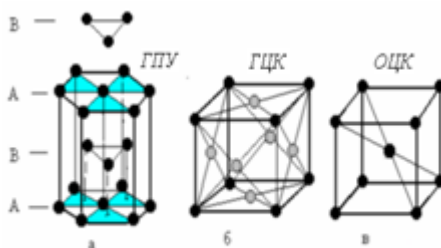


Рис. 3. Кристаллические решётки металлов.

Такие структуры называют **полиморфными (аллотропическими) модификациями** вещества, а переход от одной модификации к другой – **полиморфным (аллотропическим) превращением**.

Так, например, **углерод** существует в двух модификациях – **графит** и **алмаз**, которые при определенных условиях могут переходить друг в друга.

Из металлов примерами могут быть α -Fe (ОЦК) и γ -Fe (ГЦК), α -Sn и β -Sn и т.д.

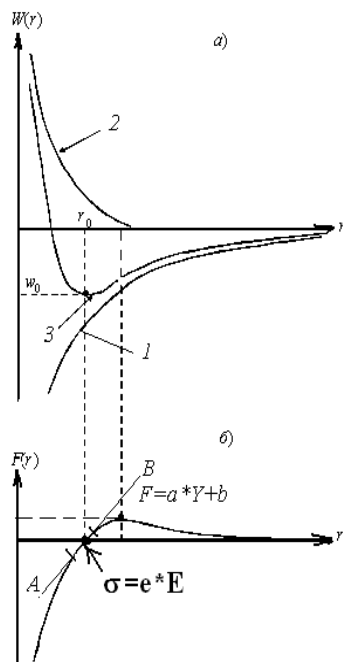
Межатомные силы

Упорядоченность кристаллической решетки является результатом действия **межатомных сил**. Именно действие этих сил устанавливает атомы в определенном порядке. Не будь этих сил, не было бы никакого порядка, и мы имели бы не кристалл, а газ.

Расположение атомов в узлах решетки соответствует их равновесному состоянию, которое характеризуется **минимумом потенциальной энергии** взаимодействия атома и взаимно уравновешенными **силами притяжения и отталкивания** от соседних атомов.

Графики сил, действующих на атом, и его энергии показаны на рис. 4.

Рис. 4. W – энергия связи, W_0 – минимальный уровень потенциальной энергии взаимодействия атомов при $r = r_0$ («энергетическая яма»); F – сила связи. 1, 2, 3 – энергии притяжения, отталкивания и результирующая.



Плотная и рыхлая упаковки шаров.

Если представить атомы в виде **шаров**, то особенности строения большинства кристаллических структур можно понять, рассматривая их как пространственную упаковку таких шаров. Атомы могут образовывать **плотнейшие упаковки шаров** и **рыхлые**.

Наиболее плотная упаковка одного слоя шаров одинакового диаметра показана на рис. 5.

В плоском слое каждый шар, например «А», окружен **шестью** другими шарами и, соответственно, **шестью треугольными пустотами**, три из которых типа «В» и три типа «С». Различие типов пустот состоит только в том, что пустоты типа «В» повернуты относительно пустот типа «С» на 60° .

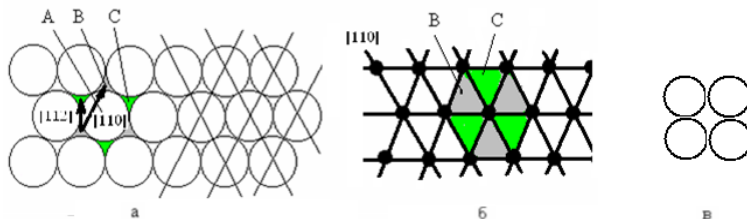


Рис. 5. Плотнейшая упаковка шаров (а) в плоскости (111) для ГЦК – Ме (трёхслойная упаковка ABC), форма пустот (б) и рыхлая упаковка шаров (в). [110] – вектор Бюргерса полной дислокации, [112] – то же частичной.

2.1.2. Индексация плоскостей и направлений в кристаллической решетке

Индексация плоскостей

Для обозначения плоскостей и направлений в кристаллической решетке используют индексы, связанные с координатными осями, выбор которых зависит от симметрии решётки. Для кубической решетки **систему координат** строят следующим образом. Начало координат помещают в одной из вершин элементарной ячейки, ось «х» направляют в сторону наблюдателя, ось «у» направляют горизонтально вправо и ось «z»

- вертикально вверх.

Положение атомной плоскости определяется отрезками, отсекаемыми ею на координатных осях. За единицу измерения вдоль каждой оси принимают параметр (период) решетки в направлении данной оси. Чтобы не иметь дело с бесконечностями, а также дробными числами, используют величины, обратные отрезкам, отсекаемым плоскостью на координатных осях, причем отношение этих величин приводят к отношению трех наименьших целых чисел (**индексов Миллера**). Совокупность таких чисел (**h,k,l**), заключенная в круглые скобки, называется **символом Бравэ** плоскости.

Примеры индексации плоскостей в кубической решетке показаны на **рис. 6**.

Индексы плоскости можно определить по **направляющим косинусам нормали** к плоскости относительно оей ординат ($\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$), приведенных к взаимно простым целым числам.

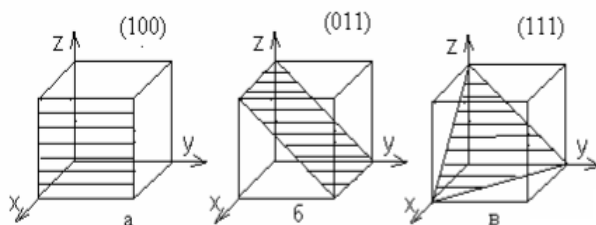


Рис. 6. Примеры индексации плоскостей в кубической решетке

Индексация направлений

Направления в кристаллической решетке обозначают **координатами конца отрезка**, проходящего через начало координат. Эти координаты называются **индексами направлений**. Полученные значения координат точки приводят к отношению трех взаимно простых наименьших целых чисел. Эти числа, заключенные в **квадратные скобки**, обозначают собой **индексы Бравэ частных направлений**.

Совокупность **непараллельных** кристаллографических

направлений, эквивалентных по числу атомов, составляя**т семейство направлений**. Его обозначают индексом одного из направлений и заключают **в угловые скобки**. Например, семейство шести ребер куба $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[\bar{1}00]$, $[0\bar{1}0]$, $[00\bar{1}]$ обозначают **$\langle 100 \rangle$** (общий символ семейства). Индексы направления также можно определить через направляющие косинусы, как и для плоскостей.

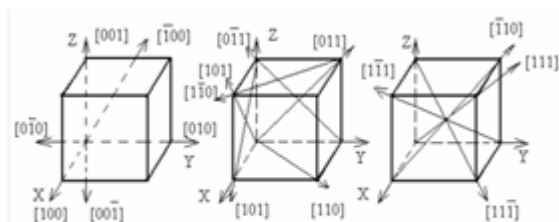


Рис. 7.

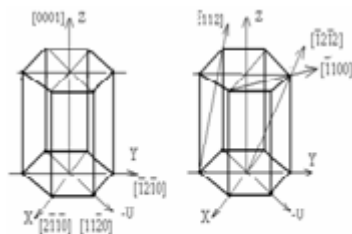


Рис. 8.

2.1.3. Дефекты кристаллической решетки

1. Понятие кристаллической структуры, моно и поликристаллы

Реальный кристалл отличается от идеального наличием тепловых колебаний атомов около положений равновесия, их миграцией (диффузией) и различного рода дефектами, нарушающими правильность решетки. Поэтому **строение реального кристалла** называется **кристаллической структурой**.

При свободном росте кристалла в растворе или расплаве внешние поверхности кристаллов в металле, повторяя правильность его внутреннего строения, должны иметь плоские грани. Образуется **огранённый кристалл** правильной геометрической формы.

Кристаллизация металла в промышленных условиях из расплава идет одновременно **из многих центров кристаллизации**, и в процессе роста кристаллов **они соприкасаются** и мешают росту друг друга. Поэтому их внешняя форма не соответствует внутреннему строению.

Поэтому их внешняя форма не соответствует внутреннему строению. Такие кристаллы с правильной кристаллической решеткой, но **неправильной внешней формой**, называются **кристаллитами** (рис. 9) или **зёрнами**.

Отдельное зерно, вырезанное из металла, или полученное специальным методом выращивания из расплава, называется **монокристаллом**. Его форма зависит от формы кристаллизатора.

По своей внешней форме **кристаллит** не является правильным многогранником, но приближается к нему, имея округлые формы. Кристаллиты, имеющие ветвистую, древовидную форму в процессе роста, называются **дендритами**. Из одного дендрита при срастании образуется одно **зерно**.

Совокупность множества кристаллитов в металле называется **поликристаллом**. Все промышленные металлы являются поликристаллами.



Рис. 9. Поликристалл

2. Анизотропия свойств металлов

Свойства кристалла зависят от природы атомов и сил взаимодействия между ними, а последние – от расстояний между атомами. Поскольку расстояния между атомами различны в разных направлениях, то и свойства кристалла неодинаковы по разным направлениям. Это явление, заключающееся в различии свойств кристаллического тела по разным направлениям, называется **анизотропией** свойств.

Кристаллические вещества анизотропны, в отличие от аморфных тел (например, смолы), которые являются **изотропными**, со свойствами, одинаковыми по всем направлениям.

Лекция 2

3. Дислокации

Дислокации являются **линейными дефектами** кристаллического строения. Они бывают краевыми и винтовыми.

Понятие краевой дислокации

Представим себе кристалл в виде параллелепипеда (рис. 10), верхняя часть которого сдвинута относительно нижней на одно межатомное расстояние, причем зафиксировано положение, когда сдвиг охватил не всю поверхность скольжения от правой грани до левой, а лишь часть этой плоскости

ABCD - участок **плоскости скольжения**, в котором произошел сдвиг, **AB** - граница этого участка (**дислокация**). Такая дислокация называется **краевой**. На поперечном разрезе параллелепипеда видно, что в результате сдвига под плоскостью сдвига содержится n вертикальных атомных плоскостей (8), а над плоскостью сдвига $n+1$ вертикальных атомных плоскостей (9). Лишнюю неполную атомную плоскость называют **экстраплоскостью**. Экстраплоскость действует, как клин, изгибая решетку вокруг своего нижнего края. Искажение решетки является не точечным, а линейным, оно распространено вдоль всей линии АВ. Линия АВ перпендикулярна направлению сдвига.

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дислокация считается **положительной** и обозначается знаком \perp , если в нижней части кристалла, то **отрицательной** и обозначается знаком ∇ .

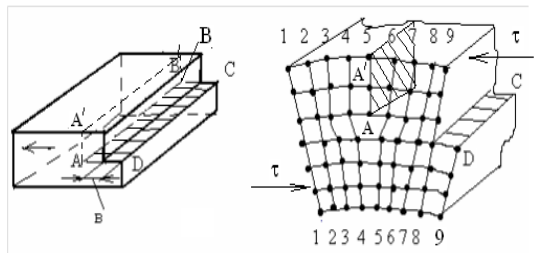


Рис. 10. К понятию краевой дислокации.

ABCD - участок **плоскости скольжения (рис.11)**, в котором произошел сдвиг, BC - граница этого участка (**дислокация**). Такая дислокация называется **винтовой (ВД)**. Обозначение: **правой** - \odot , **левой** - \ominus . Винтовая дислокация перемещается в направлении, перпендикулярном вектору сдвига, а линия винтовой дислокации параллельна вектору сдвига.

Существуют также смешанные дислокации.

Механизм перемещения дислокации

Краевые дислокации могут перемещаться **скольжением и переползанием**, а **винтовые** – только **скольжением**. Выбор механизма перемещения зависит от температуры и скорости деформации, типа решётки металла и других параметров. Для промышленных методов пластической деформации характерна **пластическая деформация скольжением дислокаций**. **Переползание** происходит при высокой температуре и медленной деформации.

Скольжение - процесс последовательного разрыва и восстановления связей кристаллической решетки (рис.12).

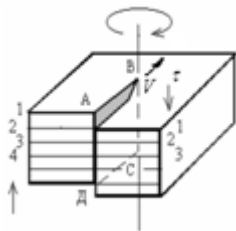


Рис. 11. Винтовая дислокация.

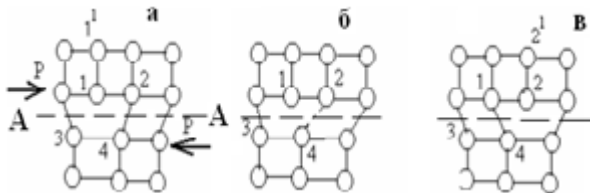


Рис. 12. Механизм перемещения дислокации на атомном уровне

Плотность дислокаций:

$$\rho = \frac{n}{l_1 l_2} = \frac{n l_3}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\sum l}{V}$$

где n-число дислокаций, l – их суммарная длина; V – объём кристалла, $l_1 - l_3$ – размеры кристалла.

Плотность дислокаций влияет на свойства металла и способность к пластической деформации.

Степень деформации зависит от плотности дислокаций и длины их пробега:

$\epsilon_n = \rho_n b l$, где b - расстояние между атомами, l - длина пробега.

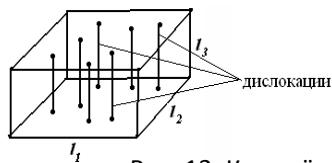


Рис. 13. К расчёту плотности дислокаций

Размножение дислокаций при пластическом деформировании

В **рекристаллизованном** металле плотность дислокаций $\rho=10^5$, в **сильно деформированном** $\rho=10^{12}$ см/см³

Механизм генерирования дислокаций в процессе деформирования был открыт в **1950 г.** английскими учеными Франком и Ридом и называется **источником Франка – Рида**.

Упрочнение металлов при пластической деформации

А. А. Бочвар в 1956 г. опубликовал качественную кривую, характеризующую прочность монокристалла в зависимости от количества несовершенств в нем (**рис.14**). При отсутствии дефектов **теоретическая прочность монокристалла** на порядок выше, чем в реальных металлах. Обычная прочность горячекатанного проката или отливки находится где-то вблизи минимума этой кривой ($\rho=10^5$).

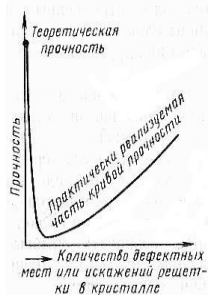
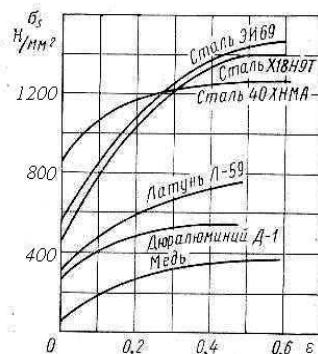


Рис. 14.

При холодной пластической деформации происходит **упрочнение металлов**, связанное с накоплением дислокаций, которые начинают мешать движению друг друга. Возникает «лес» неподвижных и **малоподвижных** дислокаций, для прорыва подвижной дислокации – носителя пластичности необходимо приложить дополнительное усилие, что и вызывает упрочнение. С ростом степени деформации растут показатели прочности: предел текучести, предел прочности, твёрдость; и снижаются показатели пластичности: относительное удлинение, относительное сужение шейки, ударная вязкость (рис. 15).

Рис. 15. Кривые наклепа некоторых металлов и сплавов



2.2. Механизмы пластической деформации.

Деформация происходит путём скольжения, двойникования и сборообразования (при больших деформациях). Выбор механизма деформации зависит от многих факторов: строения металла, температуры, степени и скорости деформации и др.

2.2.1. Системы скольжения дислокаций

Скольжение дислокаций происходит по **плоскостям скольжения (ПС)** в определённых **направлениях скольжения (НС)**, образующих **системы скольжения**.

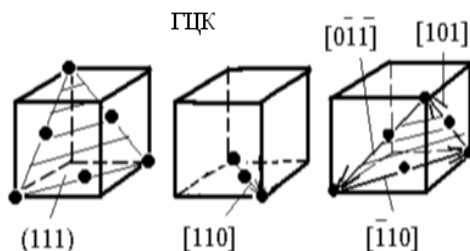


Рис. 16. Системы скольжения $\{111\} \langle 110 \rangle$ в ГЦК - металлах

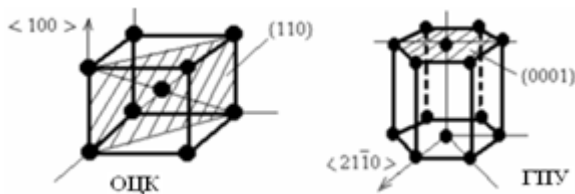


Рис. 17. Системы скольжения в ОЦК и ГПУ - металлах

Плоскость скольжения - это наиболее плотно упакованная атомами плоскость кристаллической решетки (т.е. атомная плоскость с наибольшей ретикулярной плотностью).

Направление скольжения - это направление, в котором расстояния между атомами минимальны. Например, в **гранцентрированной решетке** ПС является семейство $\{111\}$, а НС - направления семейства $\langle 110 \rangle$.

Плоскость и направление скольжения, лежащее в этой плоскости, образуют **систему скольжения (СС)**. Всего в гранцентрированной ячейке 4 ПС типа $\{111\}$ и 3 НС типа $\langle 110 \rangle$ в каждой, т. е. всего **12 СС $\{111\} \langle 110 \rangle$ ($4 \cdot 3 = 12$)**.

В **объемноцентрированной** решетке **СС $\{110\} \langle 100 \rangle$ и $\{110\} \langle 111 \rangle$** .

Всего в объемноцентрированной кубической решетке 6 плоскостей скольжения $\{110\}$ и 2 НС $\langle 100 \rangle$ в каждой, т.е. **12 СС**. Но в этой решётке возможно также действие других **СС** и всего их может быть **48**.

В **гексагональной** плотноупакованной решетке плоскостями скольжения являются плоскости **семейства $\{0001\}$** , а направлениями скольжения – направления семейства $\langle 2110 \rangle$, всего – **3 СС**.

2.2.2. Пластическая деформация и поворот решётки при сдвиге по СС

Под действием касательных напряжений происходит скольжение дислокаций по системам скольжения и сдвиг одних частей кристалла относительно других.

В результате сдвига должен происходить поворот кристаллита $d\omega$ (против часовой стрелки на рис. 18 – поз. б).

Но такой поворот запрещён внешними условиями деформации (например, при прокатке или ковке высота должна уменьшаться, а не увеличиваться) и происходит обратный поворот кристаллита с разворотом кристаллической решётки

$d\Theta = -d\omega$ (поз. в). В результате меняется ориентация кристаллической решётки относительно внешних направлений полосы и уменьшается толщина полосы (сравни поз. а, в, рис. 18).

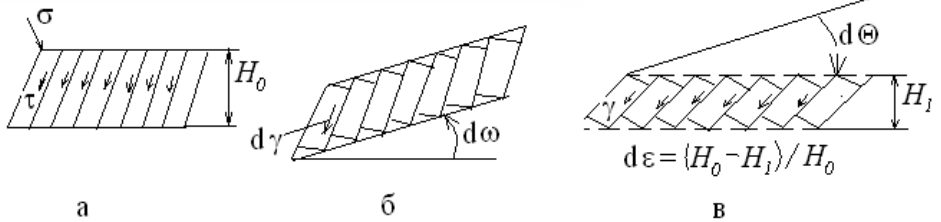


Рис. 18. Модель «домино»: сдвиги и повороты решётки при деформации:

а – кристаллит с системами скольжения до деформации;

б – поворот кристаллита в результате сдвигов по системам скольжения;

в – поворот решётки в результате вынужденной внешней деформации.

• 2.2.3. Двойникование

Оно происходит при затруднённости скольжения дислокаций по обычным СС вследствие низкой э.д.у. металла (серебро, латунь), низкой температуры или высокой скорости деформации. Двойникование осуществляется скольжением **частичных** дислокаций (в ГЦК – металлах это $\{112\}\langle 111\rangle$) вокруг винтовых дислокаций. Сопровождается **звуком** (изгиб олова). В результате образуется двойник деформации (рис. 19) и **дефект упаковки** (вместо слоёв ABC – ABAB). Изменение текстуры и свойств отличается от таковых при обычном скольжении. На поверхности **образуется рельеф** (рис. 20).

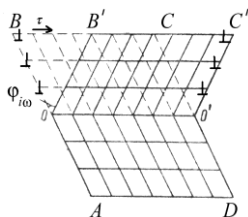


Рис. 19. Схема двойникования

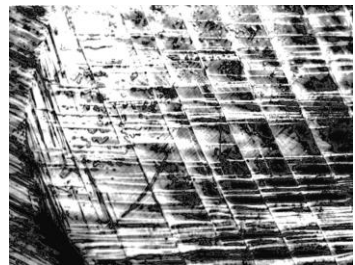


Рис. 20. Двойники деформации в крупнозернистом литом рении на полированной поверхности образца(×59)

2.3. Напряжённое состояние в точке тела

2.3.1. Тензор напряжений

Из условия, что моменты сил относительно осей x , y , z должны быть равны нулю, получим равенство касательных напряжений (рис.21)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

Эти шесть составляющих напряжений на трех взаимно перпендикулярных площадках позволяют определить напряжения на любой площадке, проходящей через данную точку. Для доказательства данного положения выделим в деформируемом теле в окрестностях исследуемой точки элементарный тетраэдр (рис. 22), три грани которого совпадают с координатными плоскостями, а четвертая пересекает все три оси координат. Ориентация наклоненной грани ABC по отношению к осям координат x , y , z определяется направляющими косинусами нормали N , т. е. величинами l , m , n . Пусть площадь треугольника ABC будет F , тогда площади треугольников $BOC = F_x$, $AOC = F_y$ и $ABO = F_z$. Так как l , m , n являются направляющими косинусами нормали N , то, очевидно,

$$F_x = Fl, \quad F_y = Fm, \quad F_z = Fn. \quad (2.1)$$

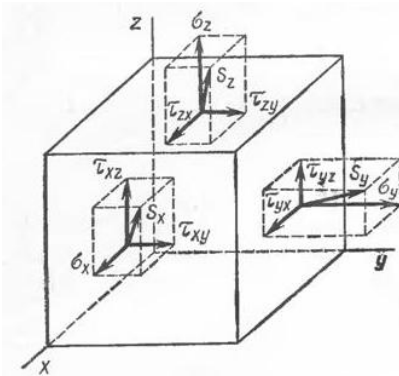


Рис.21. Схема напряжений на гранях элементарного параллелепипеда

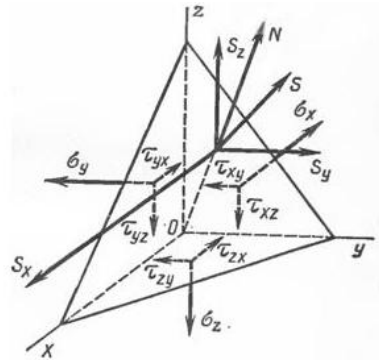


Рис.22. Схема напряжений на гранях элементарного тетраэдра

Поскольку тетраэдр находится в равновесии, то проекции действующих на него сил на соответствующие оси координат (с учетом свойства парности касательных напряжений) равны:

$$\begin{aligned} S_x F &= \sigma_x F_x + \tau_{xy} F_y + \tau_{xz} F_z; \\ S_y F &= \tau_{yx} F_x + \sigma_y F_y + \tau_{yz} F_z; \\ S_z F &= \tau_{zx} F_x + \tau_{zy} F_y + \sigma_z F_z. \end{aligned}$$

Используя соотношение (2.1) и сокращая на F , имеем:

$$\begin{aligned} S_x &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n; \\ S_y &= \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n; \\ S_z &= \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Отсюда следует, что для любой площадки напряжение на ней можно определить через **шесть величин**, образующих **симметричную матрицу**. Значения величин зависят от выбора системы координат. Совокупность этих величин, образующих симметричную матрицу, определяет тензор 2-го ранга, который называется **тензором напряжений**. Он может быть записан следующим образом:

$$T_{(\sigma)} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}.$$

Если нормаль к площадке обозначить ν , то напряжение на произвольной площадке

$$\text{где } \nu = \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = T_{\sigma} * \nu,$$

$$\text{Среднее напряжение сжатия } \sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3.$$

2.3.2. Главные напряжения и главные направления

На произвольных площадках есть **касательные напряжения**. Можно доказать, что **есть 3 взаимноперпендикулярные площадки, на которых касательные напряжения равны нулю**. Если перпендикулярно этим площадкам провести оси координат, то эти оси называются **главными осями**, а напряжения на этих площадках – **главными напряжениями**. Они обозначаются $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

В главных осях тензор напряжений упрощается и имеет вид:

$$T_{(\sigma)} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$$

Тензор широко применяется, т.к. все выражения значительно упрощаются.

Схемы главных напряжений

Напряжения могут быть положительные, отрицательные и ноль.

Всего существует **9 схем** главных напряжений, описывающих все возможные способы деформирования тела:

- 2 линейные схемы,
- 3 плоские схемы
- 4 объёмные схемы

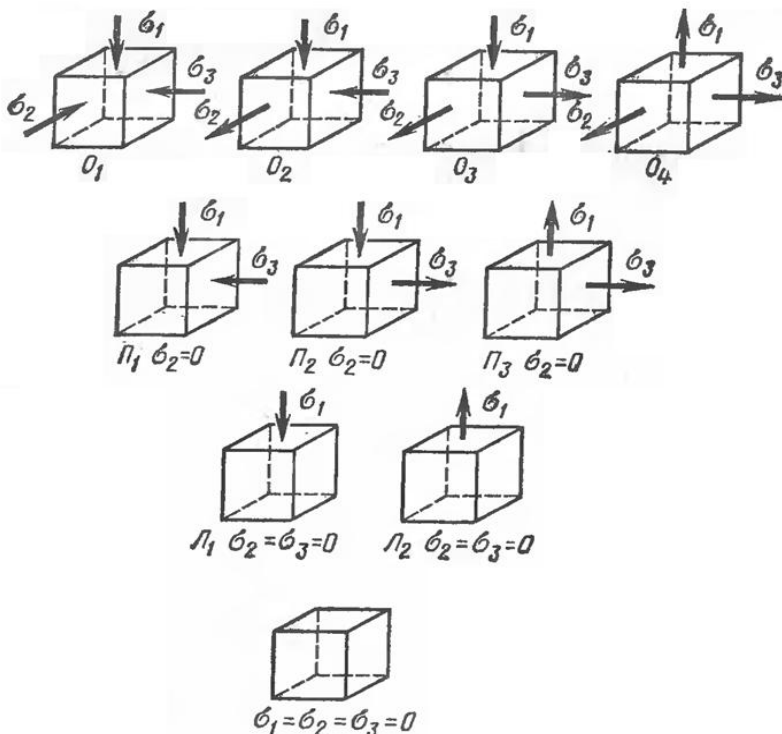


Рис. 23. Возможные схемы напряженного состояния элементарного куба в главных осях

2.4. Величины, характеризующие деформированное состояние в точке тела

2.4.1. Перемещения в координатных осях, компоненты деформации. Тензор деформаций.

Пусть точки пластически обрабатываемого тела меняют свое первоначальное положение, смещаясь благодаря деформации. Тогда, например, точка A с координатами x, y, z в некоторый момент деформации, близкий к начальному, перемещается в положение A_1 с координатами x_1, y_1, z_1 (рис. 24). Вектор AA_1 указывает перемещение точки A в принятый момент деформации тела. Его проекции на координатные оси x, y, z , обозначенные соответственно через u_x, u_y, u_z , являются ком-

понентами перемещения. Элементарный параллелепипед с ребрами dx, dy, dz , взятый в обрабатываемом теле в окрестностях точки A , при деформировании изменит свое положение и форму, т. е. ребра параллелепипеда изменят длину, а углы между ними не будут прямыми. Это означает, что ребра получают линейную деформацию, а углы между ребрами — угловую (или сдвиговую)

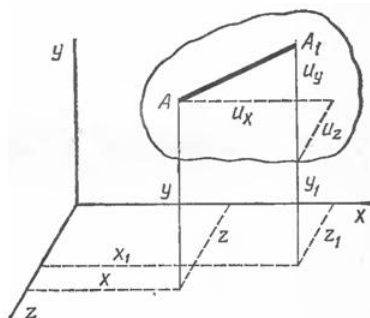


Рис. 24. Компоненты перемещения при деформации тела

На рис.25,а $abcd$ представляет собой проекцию грани параллелепипеда до деформации, а $a_1b_1d_1c_1$ — после деформации. Относительное удлинение ребра ac , параллельного до деформации оси Ox , составляет

$$\varepsilon_x = \frac{a_1c_1 - ac}{ac} = \frac{du_x}{dx},$$

а ребра ab , параллельного до деформации оси Oy :

$$\varepsilon_y = \frac{a_1b_1 - ab}{ab} = \frac{du_y}{dy}$$

Угол поворота ребра ac в плоскости xOy

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha = du_y/dx.$$

угол поворота ребра ab в плоскости xOy

$$\beta = du_x/dy.$$

Тогда полное уменьшение прямого угла bac , т.е. относительный сдвиг,

$$\omega = \gamma_{xy} = \alpha + \beta = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x.$$

По аналогии $\epsilon_x = \partial u_x / \partial x$, $\epsilon_y = \partial u_y / \partial y$, $\epsilon_z = \partial u_z / \partial z$.

Относительные сдвиги:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}.$$

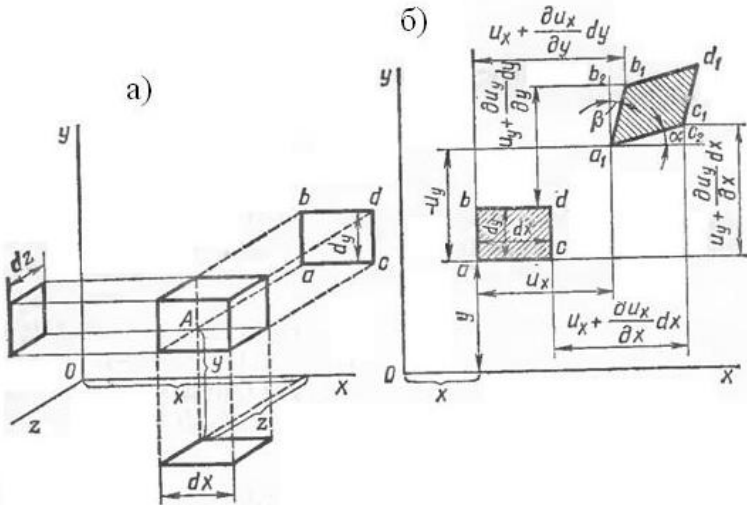


Рис. 25. Элементарный параллелепипед до деформации (а) и его проекция на плоскость xOy до и после деформации (б)

Полный относительный сдвиг в рассматриваемом примере состоит из угла поворота ребра ac , параллельного оси Ox , в направлении оси Oy , и угла поворота ребра ab , параллельного оси Oy , в сторону оси Ox . При этом совершенно не имеет значения, каковы размеры углов поворота α и β . Важно, чтобы их сумма оставалась постоянной, равной полному уменьшению прямого угла, т. е. равной ω . Если принять поворот каждого ребра на вполне определенный угол, равный половине изменения прямого, то полный относительный сдвиг

$$\omega = \frac{1}{2}\gamma_{xy} + \frac{1}{2}\gamma_{yx}.$$

Если компоненты деформации расположить в виде таблицы, подобно тензору напряжений, получим матрицу, которую называют тензором деформаций:

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{xy} & 1/2\gamma_{xz} \\ 1/2\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 1/2\gamma_{yz} \\ 1/2\gamma_{zx} & 1/2\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Соответствующие углы поворота ребер параллелепипеда при деформации будут равны между собой, т. е.

$$1/2\gamma_{xy} = 1/2\gamma_{yx}, \quad 1/2\gamma_{yz} = 1/2\gamma_{zy} \quad \text{и} \quad 1/2\gamma_{zx} = 1/2\gamma_{xz}.$$

Следовательно, тензор деформации является симметричным. Отсюда понятно, что деформированное состояние в точке полностью определяется шестью компонентами деформации.

2.4.2. Главные деформации

Выведенные формулы теории напряженного состояния можно использовать для написания формул теории деформированного состояния, подставляя в них соответствующие компоненты деформации. Так, например, в любой точке деформируемого тела можно обнаружить такие три взаимно перпендикулярные оси, в системе которых отсутствуют угловые деформации и имеются изменения лишь продольных размеров. По аналогии с напряженным состоянием эти оси называются главными осями деформированного состояния, а относительные удлинения вдоль этих осей называются главными и обозначаются $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

Выражение для тензора деформации в главных осях имеет вид

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}.$$

Всего имеется 3 схемы деформированных состояний в главных осях (рис. 26). При этом важно понять, что схемы главных напряжений и деформаций могут не совпадать. Например, при

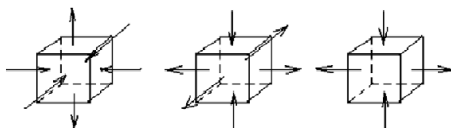


Рис. 26. Основные схемы главных деформаций

растяжении схема напряжённого состояния линейная, а деформированного – объёмная.

Лекция 3

2.5. Условия текучести

Переход от упругой деформации к пластической при повышении напряжений происходит при определённых условиях, зависящих от вида напряжённого состояния. При одноосном напряжённом состоянии **условие пластичности**:

$$\sigma \geq \sigma_T.$$

При объёмных напряжённых состояниях условие пластичности будет сложнее.

Вид условия будет зависеть от принятых допущений.

2.5.1. Условие начала ПД монокристалла

Рассмотрим деформацию монокристалла растяжением (рис. 27).

Через точку можно провести множество сечений, у каждого из них своя площадь и, значит, **в каждом сечении – своё напряжение**. Например, при растяжении цилиндрического образца с поперечным сечением S (площадка S перпендикулярна оси растяжения) силой P в этом сечении возникает нормальное (перпендикулярное) к сечению напряжение

$$\sigma_0 = P/S.$$

В косом сечении под углом α площадь уже будет $F=S / \cos \alpha$, а сила P может быть разложена на **нормальную** к сечению $P \cos \alpha$ и **касательную**, действующую в плоскости сечения, $P \sin \alpha$.

Соответственно, в наклонном сечении будет действовать **полное напряжение** в направлении действия силы P :

$$\sigma = P/F = P / (S / \cos \alpha).$$

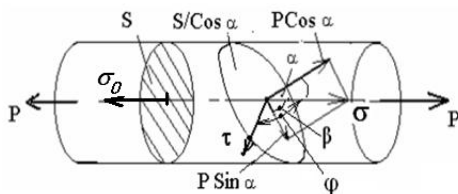


Рис. 27. Разложение сил на площадке скольжения в монокристалле

Пусть **наклонная плоскость** на рисунке является **возможной плоскостью скольжения** (т.е. относится к наиболее плотноупакованным плоскостям), а возможное **направление скольжения** в ней показано направлением τ . Чтобы произошёл сдвиг в этом направлении, напряжение τ должно быть больше критического напряжения сдвига по данной системе скольжения (напряжения Пайерлса)

$$\tau > \tau_k.$$

Проецируем напряжение растяжения σ на направление τ и преобразуем

$$\tau = \sigma \cos \varphi = [P / (S / \cos \alpha)] \cos \varphi = (P/S) \cos \varphi \cos \alpha = \sigma_0 \cos \varphi \cos \alpha > \tau_k.$$

Отсюда получаем **условие сдвига** по наклонной площадке

$$\sigma_0 = \tau_k / (\cos \varphi \cos \alpha).$$

Выражение **($\cos \varphi \cos \alpha$)** в знаменателе называется **фактором Шмида** или **ориентационным фактором**. Так как разные **системы скольжения (СС)** по разному наклонены к направлению растяжения, то их факторы Шмида различны. При одинаковом τ_k для разных СС сдвиг при растяжении силой P (которая увеличивается при приложении нагрузки от нуля) начнётся по системе скольжения с наибольшим фактором Шмида, так как тогда σ_0 (и P) для этой системы будет наименьшим, т.е.

$$\sigma_T = \sigma_0 = \tau_k / (\cos \varphi \cos \alpha)_{\max}$$

где $(\cos \varphi \cos \alpha)_{\max}$ – наибольший из возможных факторов Шмида.

Это выражение называют **условием начала пластической деформации монокристалла** при растяжении.

2.5.2. Условие начала ПД поликристалла

В поликристалле всегда есть СС с наибольшим возможным фактором Шмида

$$\cos \varphi \cos \alpha = 1/2$$

Подставляем это выражение в условие пластичности монокристалла и получаем условие пластичности поликристалла

$$\sigma_T = \sigma_0 = \tau_k / (\cos \varphi \cos \alpha)_{\max} = 2 \tau_k.$$

2.5.3. Условие пластичности Сен-Венана для сложного напряжённого состояния

Должно выполняться $\tau_{\max} \geq \tau_k$. Тогда из предыдущего $\tau_{\max} \geq \tau_k = \sigma_T / 2$. Из теории ОМД известно, что $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$, откуда получаем условие пластичности **Сен-Венана** :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T$$

Оно не учитывает 2-е главное напряжение, ошибка м.б. до **16%**.

2.5.4. Энергетическое условие пластичности Губера – Мизеса

По этому условию пластическая деформация начинается тогда, когда удельная потенциальная энергия изменения формы тела достигает определённой величины. Получим

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_T$$

где $\beta = 1 \dots 1,155$ – коэффициент Лодэ (учитывает вид напряжённого состояния).

2.6. Обобщённые напряжение и деформация. Связь между напряжениями и деформациями.

При одноосном растяжении σ - ϵ Гука: $\sigma = E \epsilon$

где E – модуль Юнга, ϵ – относительная деформация.

Для объёмного напряжённого состояния для упругой деформации

$$\sigma_i = E \epsilon_i$$

Для пластической деформации:

$$\sigma_i = \sigma_s (\epsilon_i / \epsilon_s)^n ,$$

где n - коэф. Упрочнения.

Обобщённое напряжение (интенсивность напряжений):

$$\sigma_i = 1/\sqrt{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} .$$

Обобщённая деформация (интенсивность деформаций):

$$\epsilon_i = \{ \sqrt{2} / [2(1 + \mu)] \} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} ,$$

где μ – коэффициент Пуассона.

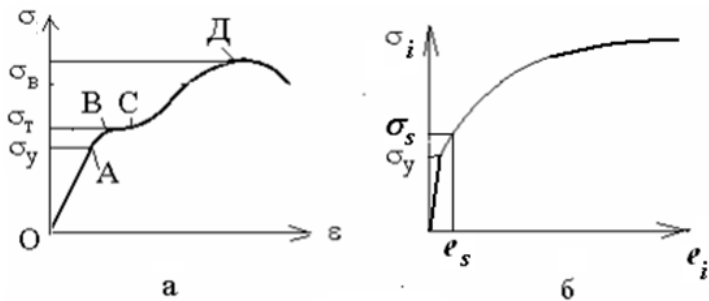


Рис. 28. Диаграмма растяжения в условных (а) и истинных (б) координатах

2.7. Трение при ОМД

Различают следующие виды трения: 1. Сухое трение; 2. жидкостное (гидродинамическое); 3. граничное .

2.7.1. Сухое трение.

В процессе взаимного перемещения инструмента и деформируемого металла их поверхности вступают в механическое зацепление своими неровностями.

В результате на поверхности контакта одновременно осуществляется **упругая и пластическая деформация выступов (рис. 16)**. Кроме того, между соприкасающимися поверхностями действуют **силы молекулярного сцепления**. Закон **Амонтона - Кулона** выражается соотношением:

$$T = \mu P + F,$$

где T – сила трения, P – нормальная сила, направленная по нормали к поверхности контакта, F – сила молекулярного сцепления и μ – коэффициент трения.

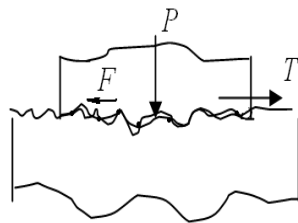


Рис. 29.Схема возникновения сил трения

Силы молекулярного сцепления **при ОМД** пренебрежимо малы по сравнению с первым членом, поэтому закон Кулона используют в упрощенном виде:

$$\tau = \mu\sigma,$$

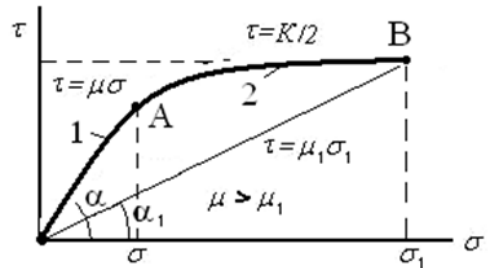
где $\tau = T/S$, $\sigma = P/S$, S – площадь контактной поверхности.

Однако закон Кулона справедлив только при небольших нормальных контактных напряжениях, когда в процессе взаимодействия трущихся поверхностей преобладают упругие деформации их выступов. При увеличении нормального давления σ доля пластической деформации возрастает, и при значительном ее развитии касательные напряжения на контакте приобретают максимально возможное значение, равное пределу текучести материала на сдвиг (рис. 30):

$$\tau = K/2.$$

Здесь K – истинный предел текучести при данных условиях обработки металла.

Рис. 30. Экспериментальная зависимость касательных напряжений от нормальных на поверхности контакта (кривая Епифанова Е.И.)



2.7.2. Жидкостное трение

При жидкостном трении закон трения хорошо описывается зависимостью (закон Ньютона)

$$\tau = \eta u/h,$$

где η – коэффициент вязкости жидкости и u – скорость перемещения металла относительно инструмента, h – толщина слоя смазки.

Жидкостное трение реализуется в очаге деформации реальных процессов только в том случае, когда в слое смазки создается давление, превышающее давление металла на инструмент, иначе смазка выжимается из очага, и трение переходит в разряд граничного.

2.7.3. Граничное трение

Большинство процессов ОМД протекают в режиме **граничного**

трения. Он легче осуществляется, чем гидродинамический режим.

Кроме того, **качество поверхности металла при граничном трении выше, чем при жидкостном.** При граничном трении **срезание гребней металла** при контакте с инструментом повышает чистоту поверхности металла. Металл становится блестящим, почти полированным.

2.7.4. Смазки

Чем выше способность металла удерживать смазку и выше поверхностная активность смазки, тем меньше она выдавливается из очага деформации. **Хорошие смазки представляют собой вытянутые цепочки, на концах которых имеются так называемые полярные группы.** На трущихся поверхностях эти группы прочно удерживаются металлом, а остальные участки цепочки образуют слои, через которые происходит относительное скольжение металла и инструмента.

Требования к смазкам:

1. высокая адгезионная способность, 2. дешевые, 3. не опасные для здоровья, 4. не должны разлагаться при хранении на складе, 5. не должны вызывать коррозию металла при деформации и 6. не должны способствовать его коррозии после ОМД и др.

При обработке давлением, по классификации **А.К.Чертавских**, наиболее употребительны **смазки следующих типов:**

1. Минеральные масла, керосин.

2. Эмульсии масло-вода, которые представляют собой мелко распыленные капли масла в воде с различными добавками. Эмульсии применяются при волочении тонкой проволоки, холодной прокатке ленты и фольги и служат не только для снижения коэффициента трения, но и **охлаждения** металла и инструмента при деформации.

3. Масла растительные и животные, содержащие жирные кислоты. Такие смазки обладают повышенной прочностью,

поэтому применяются при высоких давлениях металла на инструмент, например, при волочении и прокатке более толстых проволоки и полос, чем при использовании эмульсии, при штамповке и других операциях холодной обработки давлением. Животные жиры обладают лучшими смазочными свойствами, чем растительные.

4. Масла с наполнителями содержат в качестве наполнителя такие материалы, как **тальк, слюда, графит, сульфид молибдена**, легкоплавкие металлы в виде пудры и др. Наполнители увеличивают толщину слоя смазки, образуют дополнительные поверхности скольжения внутри смазочного слоя. Смазки с наполнителями эффективно снижают коэффициент трения и улучшают **качество поверхности** изделия.

5. Консистентные смазки, представляющие собой **смеси минеральных масел, воды и различных мыльных или парафиновых добавок (например, солидол)**. Такие смазки применяются при сравнительно **низких давлениях металла** на инструмент. Есть примеры использования таких смазок (а также смазок с наполнителями) при горячей деформации металла, например, при прессовании металлов, реже при горячей прокатке.

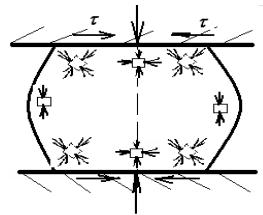
6. При горячей деформации, особенно при обработке труднодеформируемых материалов, в качестве смазки применяют также **стекла, обмазки из окислов металлов** и пр., которые предназначены не только для снижения коэффициента трения, но и предохранения металла **от окисления** при нагреве и в процессе деформации.

2.7.5. Влияние трения на НДС

Трение повышает усилие деформирования и создаёт **неравномерность деформаций** (образуется бочка) и распределения напряжений по объёму. Это приводит к различным **дефектам** и существенно затрудняет расчёты процессов ОМД. Под действием касательных напряжений главные оси деформации поворачиваются

(рис. 31).

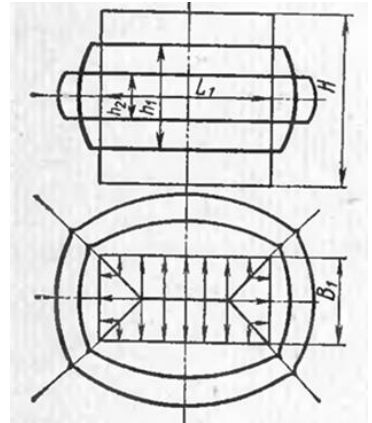
Рис. 31. Поворот главных осей тензора напряжений под действием сил трения.



Вполне очевидно, что преимущественное перемещение металла совпадает с направлением наименьшего сопротивления сил трения со стороны инструмента, и это положение называют законом наименьшего сопротивления.

Металл интенсивнее течёт вдоль короткой стороны и периметр приближается к окружности (закон наименьшего периметра) (рис. 32).

Рис. 32. Схема изменения периметра параллелепипеда между плоскими бойками при деформации с трением



Лекция 4

2.8. Пластичность и разрушение металлов при ОМД

Процессы ОМД возможны при условии, если деформируемые металлы обладают пластичностью, т.е. способностью необратимо изменять свою форму без разрушения.

Пластичность при ОМД зависит от структуры металла, вида НДС, скорости деформации и температуры.

По виду ОМД предложено несколько критериев пластичности, однако наиболее теоретически обоснованным считается величина:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$$

Критерий представляет собой отношение гидростатического давления (без знаменателя)

$$p = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

к интенсивности напряжений в точке разрушения

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Он меняется от $-\infty$ до $+\infty$. При $+\infty$ всегда хрупкое разрушение.

Разрушение многих материалов наступает тогда, когда количество дефектов (дислокаций и других) достигнет определенного значения. Это значение названо **ресурсом пластичности**.

Разрушение металла может быть **хрупким и вязким**. Хрупкое разрушение, или разрушение путем отрыва, происходит без заметной пластической деформации.

Если же разрушению предшествует значительная пластическая деформация, то разрушение металла будет вязким. По виду оно отличается от хрупкого. Для хрупкого разрушения характерны трещины под углом 45° к направлению действия главных напряжений, а вязкое разрушение происходит под углом 90° к действующей нагрузке.

В реальных технологических процессах обычно разрушение начинается как вязкое, но заканчивается как хрупкое.

Наиболее надежные сведения о пластичности можно получить при испытаниях в обычных производственных условиях или в условиях, аналогичных производственным, с учетом масштабного фактора. Однако создать подобные условия не всегда представляется возможным. Поэтому для различных технологических процессов обработки металлов давлением широко используют соответствующие показатели пластичности.

О пластических свойствах металла часто судят по результатам испытаний образцов на разрыв и кручение. Характеристикой пластичности в данном случае принимается относительное удлинение δ , %, относительное сужение шейки ψ , %, и число закручиваний образца до его разрушения. Распространенным способом определения пластичности является «проба на осадку», когда пластичность оценивается деформацией осаживаемых цилиндрических образцов между параллельными плитами, при которой начинают появляться трещины Набоковой поверхности. Сопоставимые относительные характеристики пластичности различных металлов по деформации до разрушения можно определять также при прокатке клиновых образцов в цилиндрических валках, а также прокатке слитков или заготовок постоянного течения на клин в валках с эксцентрично врезанными ручьями.

Способность листового металла принимать пластическую деформацию в холодном состоянии определяется на приборе Эриксона. Вырезанный из листа кружок, зажатый по контуру, выдавливается в колпачок на винтовом прессе вручную до момента появления трещины в доньшке колпачка. За относительную характеристику пластичности, т. е. способность данного металла к вытяжке, принимается глубина колпачка в миллиметрах, отвечающая началу образования трещины.

Пластичность металла существенно зависит от его химического состава, который в большинстве случаев является заданным в очень узких пределах как параметр, определяющий свойства продукта обработки. Наибольшую пластичность проявляют чистые металлы и их твердые растворы, наименьшую — химические соединения.

При температурах обработки, близких к абсолютному нулю, металл принимает минимальную пластичность в силу уменьшения тепловой подвижности атомов. С другой стороны, при температурах, близких к плавлению металла, когда подвижность атомов становится слишком велика, можно ожидать нарушения границ зерен, т. е. наблюдать потерю пластичности металла. Наибольшую пластичность металлы имеют в интервале между температурой рекристаллизации и температурой плавления $T_{пл}(T_p=0,47T_{пл})$. Однако верхний предел должен быть ниже температуры окисления и разрушения границ зерен, чтобы не допускать потерю пластичности металла по этой причине.

На основании многочисленных исследований можно считать, что при горячей обработке влияние скорости деформации на пластичность металлов определяется совокупным действием двух факторов. С одной стороны, с ростом скорости деформации пластичность понижается, поскольку увеличивается интенсивность упрочнения, с другой стороны, при увеличении скорости деформации возрастает нагрев — значительная часть энергии деформации превращается в теплоту, что повышает температуру обрабатываемого тела. Это стимулирует развитие диффузионных процессов и разупрочнение и, следовательно, повышение пластичности, если, конечно, тепловой эффект деформации не повышает температуру обрабатываемого тела до температур перегрева.

Рассмотренные основные параметры ОМД, влияющие на пластичность металла и усилия деформирования, нельзя анализировать изолированно один от другого, так как в момент обработки они действуют совместно.

Следует также помнить, что некоторые способы обработки, повышающие пластичность металла, влекут за собой увеличение усилия, необходимого для деформации, а понижающие пластичность — уменьшение усилия деформации. Поэтому необходимо выбирать оптимальные условия обработки, учитывая силовые и энергетические параметры и влияние принятых технологических операций на качество изделия.

2.9. Давление обрабатываемого металла на инструмент

Полное усилие деформации определяется суммированием удельного усилия по всей контактной поверхности:

$$P = \int_F p_x dF.$$

Численные значения удельных усилий могут быть получены опытным путем или расчетом с использованием аналитических методов.

Строгое решение задач теории пластичности требует решения системы из 21 уравнения, большинство из которых являются дифференциальными. Такое решение возможно с применением МКЭ.

Многие задачи можно упростить, считая НДС плоским или линейным (осесимметричным). Есть разные способы решения таких задач.

Расчет рабочих напряжений совместным решением приближенных уравнений равновесия и уравнений пластичности позволяет находить напряжения на контактной поверхности соприкосновения металла с инструментом и полное усилие деформации. Он во многих случаях вполне удовлетворяет требованиям практики. В качестве упрощающего допущения в данном случае принимается, что напряженно-деформированное состояние является осесимметричным или плоским. При резко выраженной неоднородности деформации тело разделяют на объемы, чтобы в каждом из них напряженно-деформированное состояние можно было принять плоским или осесимметричным. Составляя дифференциальное уравнение равновесия, обычно допускают, что нормальные напряжения в данном сечении не изменяются, а принимают осредненное значение и зависят только от одной координаты.

В качестве примера рассмотрим осадку параллелепипеда между параллельными плитами. Выделим элемент $l \times h \times dx$ (рис 33) толщиной dx и спроектируем на ось x все силы, действующие на этот элемент. Получим **дифференциальное уравнение равновесия** горизонтальных сил (длина образца сокращается):

$$-\sigma_x \cdot h + (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h - 2\tau_x \cdot dx = 0$$

После преобразований оно запишется в виде:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau_x}{h} = 0.$$

Для поиска неизвестных добавим к этому уравнению:

-**условие начала пластического течения**

$$\sigma_x - \sigma_y = K$$

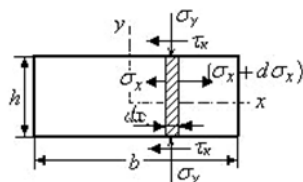
- и **условие трения** на контактных поверхностях

$$\tau_x = f(\sigma_y)$$

Решение системы в случае скольжения по контактной поверхности:

$$\sigma_y = -K \cdot e^{\frac{2\mu}{h}(\frac{b}{2}-x)}$$

Рис. 33. К составлению дифференциального уравнения равновесия горизонтальных сил



Гл.3. Теоретические основы продольной прокатки

3.1. Основные понятия и определения продольной прокатки

Линейные размеры прокатываемых полос, мм (рис.3.1):

H, B, L – соответственно, высота, ширина и длина заготовки;

h, b, l - то же раската;

R, D - радиус и диаметр валков;

AA' - точки начального соприкосновения металла с валками;

BB' - точки конечного соприкосновения металла с валками;

AB - дуга захвата;

b_c - средняя ширина полосы: $b_c = \frac{B+b}{2}$;

α - угол захвата, град; h_c - средняя высота полосы $h_c = \frac{H+h}{2}$,

или более точно: $h_c = \sqrt{H \cdot h}$,

F - площадь контактной поверхности металла с валками, мм².

l_c – длина очага деформации; l_c/h_c - показатель формы очага деформации.

Область, ограниченная дугами захвата, плоскостями входа и выхода металла из валков, а также боковыми гранями полосы (заштрихована) называется **геометрическим очагом деформации** или зоной, поясом деформации.

3.1.1. Длина очага деформации

Из рис.3.1 следует $AC^2 = OA^2 - OC^2$, или

$$l_d^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}.$$

Пренебрегая вторым членом из-за его малости по сравнению с первым, окончательно получим

$$l_d = \sqrt{R\Delta h}.$$

Из того же рисунка

$$l_d = R \cdot \sin \alpha \cong R \cdot \alpha.$$

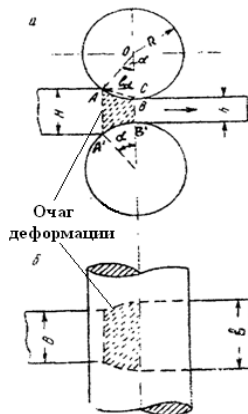


Рис. 3.1. Схема очага деформации

3.1.2. Показатели деформации

1. Абсолютные:

- обжатие $\Delta h = H - h$, мм;

- уширение $\Delta b = b - B$, мм;

- удлинение $\Delta l = l - L$, мм.

2. Относительные:

обжатие $\epsilon = \frac{H - h}{H} = \frac{\Delta h}{H}$.

3. Коэффициенты деформации

- обжатия $\eta = \frac{H}{h}$,

- уширения $\beta = \frac{b}{B}$,

- удлинения (вытяжки) $\mu = \frac{l}{L}$.

Показатель уширения $K = \frac{\Delta b}{\Delta h}$ показывает, какая часть

обжатого металла расходовалась на уширение.

3.1.3. Условие захвата металла валками

В момент соприкосновения полосы с валками она находится под действием нормальной силы давления N и касательной силы трения T (рис. 3.2).

Горизонтальные проекции этих сил будут N_x и T_x , направленные в разные стороны. Сила N_x стремится оттолкнуть полосу от валков, а сила T_x , наоборот, втянуть полосу в валки. Пока $N_x > T_x$, захват полосы невозможен. Но как только установится условие $N_x < T_x$, произойдет так называемый естественный начальный захват металла валками.

Каково будет при этом соотношение угла захвата и коэффициента (угла) трения? Из рис. 3.2 следует

$$N_x = N \sin \alpha \text{ и } T_x = T \cos \alpha .$$

Тогда условие начального захвата будет

$$N \cdot \sin \alpha \leq T \cdot \cos \alpha .$$

Разделив левую и правую части на $N \cos \alpha$,

получим $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \leq \frac{T}{N}$, или $\operatorname{tg} \alpha \leq f$. (т.к. $T = Nf$)

$$\text{или } f \geq \sqrt{\Delta h / R} .$$

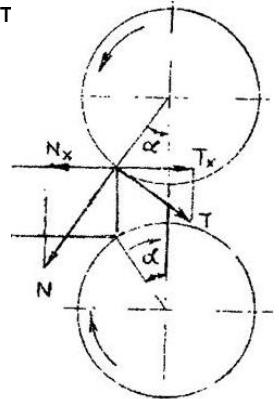


Рис. 3.2. Схема сил, действующих в момент захвата

3.2. Кинематические условия процесса прокатки.

Рассмотрим характер течения металла в очаге деформации при прокатке **относительно валков** и связанные с этим **понятия**:

- зоны отставания и опережения;
- нейтральное сечение, нейтральный угол;
- характер сил трения по зонам;
- формы очага деформации: низкий, средний, высокий.

Чтобы проанализировать характер напряжений и деформаций при установившемся процессе прокатки и рассчитать силу прокатки, необходимо рассматривать характер распределения сил трения в очаге деформации, т.к. они определяют контактные условия для расчёта напряжений в объёме очага деформации.

Мы можем считать, что мгновенная **картина прокатки** представляет собой мгновенную **картину осадки** двумя цилиндрическими валками как наклонными бойками. Как и при осадке, есть точка, по разные стороны от которой металл течёт в разные стороны - направо или налево относительно валков. Как и при осадке, на контакте металла с валками имеются (рис. 3.4) **зоны скольжения (I, II) и прилипания (III)**. Зона прилипания разделяется на зоны **торможения и застоя**. В последней силы трения меняют направление на обратное, проходя через ноль.

На поверхности контакта касательные **напряжения трения τ** должны нарастать от периферии к центру очага деформации **в соответствии с кривой Епифанова Е.И.**: сначала по закону Кулона (участок 1) $\tau = \mu\sigma$, а затем, достигнув предельного значения, оставаться постоянными (участок 2) (рис.3.5а)

$$\tau = K/2.$$

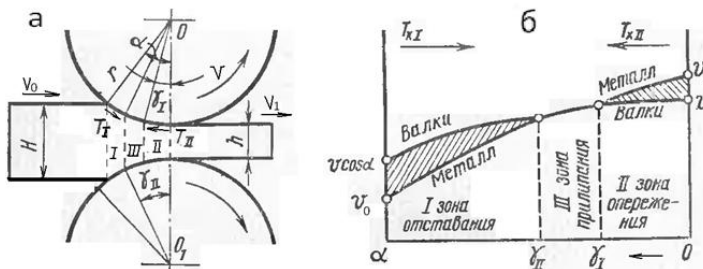


Рис. 3.4. Схема очага деформации (а) и скорости по зонам (б)

3.2.2. Формы очага деформации

Соотношение между зонами скольжения и прилипания зависит от формы очага деформации и может быть приближённо выражено через геометрические параметры очага деформации (хотя это соотношение определяется также и условиями трения на контакте). И.Я.Тарновский установил, что характеристикой геометрии очага деформации служит критерий l/h_{cp} , (где l – длина дуги захвата и h_{cp} – средняя высота очага деформации,

$$h_{cp} = (h_0 + h_1)/2.$$

В зависимости от значения этого параметра, очаги деформации делятся **на низкие, средние и высокие**.

1. Примерно при $l/h_{cp} < (0,5 \div 1)$ очаги деформации считают **высокими**, зоны **скольжения** на таких очагах практически полностью **вырождены**. Есть только зоны прилипания.

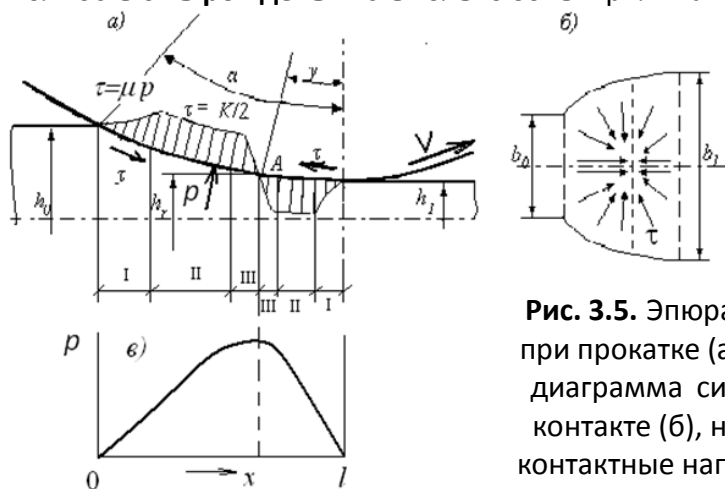


Рис. 3.5. Эпюра сил трения при прокатке (а), векторная диаграмма сил трения на контакте (б), нормальные контактные напряжения (в).

2. При отношениях примерно $1 < l/h_{cp} < 4-5$ достаточно развиты как зоны скольжения, так и прилипания, и очаг деформации становится **средним**.

3. При $l/h_{cp} > 4-5$ очаг деформации практически полностью занят зонами скольжения и называется **низким**.

4. В последние годы введено понятие **сверхнизкого очага деформации** (его называют ещё **фольговым**, хотя он может образоваться и при прокатке тонких листов и лент.

В середине фольгового очага есть **участок упругой деформации**, на котором силы трения равны нулю. Остальное – зоны скольжения. Для фольгового очага $l / h_{cp} \gg 4-5$. Точные границы данного параметра для этого случая пока не установлены.

3.2.3. Нейтральный угол

Пусть очаг деформации является **низким**. Прокатка осуществляется с малым коэффициентом трения. Для тонких полос с низкими очагами применима **гипотеза плоских сечений**, в соответствии с которой плоские до прокатки сечения останутся плоскими в процессе и после прокатки. Скорости перемещения частиц металла не зависят от координаты y , а все **напряжения** в любой вертикальной плоскости **постоянны по высоте** полосы .

Очаг деформации для таких полос представляет собой **две зоны**, в каждой из которых происходит **скольжение** металла относительно валков:

- в зоне **левее точки А** (рис.3.5) или N (рис. 3.7) металл скользит относительно валков в направлении сечения входа, скорость его перемещения меньше, чем окружная скорость валков, металл отстает от валков, поэтому она называется **зоной отставания**;

- **правее точки А (или N)** металл опережает валки, поэтому этот участок очага деформации называется **зоной опережения**. Сечение AA (NN), разделяющее эти зоны, называется **нейтральным**, а угол валка γ , соответствующий ему, - **нейтральным углом**. В точке **А** и по всему нейтральному сечению **АА** скорости полосы и валков совпадают. Сечение AA может быть изогнуто.

Нейтральный угол γ найдем, спроектировав все силы, действующие на контактной поверхности, на ось x . На **рис. 3.6** выделен элемент толщиной dx в зоне опережения на угловом расстоянии φ от сечения выхода протяженностью вдоль валка $r \cdot$

$d\varphi$ (площадью $rb d\varphi$), где r – радиус валка и b – ширина полосы. На этот элемент действуют контактные нормальные p и касательные напряжения $\tau = \mu p$.

Для контактной площадки классического очага деформации в целом имеем **условие равновесия сил**, действующих вдоль оси x :

$$-\int_0^{\alpha} p \sin \varphi \cdot rb \cdot d\varphi - \int_0^{\gamma} \mu p \cos \varphi \cdot rb \cdot d\varphi + \int_{\gamma}^{\alpha} \mu p \cos \varphi \cdot rb \cdot d\varphi = 0$$

Если положить, что уширение при прокатке отсутствует ($b = const$), а также считать, что нормальное напряжение p представляет собой среднее давление по очагу, которое одинаково в зоне опережения и отставания, то все члены уравнения можно **сократить** на prb , тогда после интегрирования и подстановки пределов получим:

$$\cos \alpha - \cos 0 - \mu \cdot \sin \gamma + \mu \cdot \sin 0 + \mu \cdot \sin \alpha - \mu \cdot \sin \gamma = 0$$

Простые преобразования приводят к выражению:

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}$$

При малых углах α , подставив их, получаем **формулу И.М.Павлова** для нейтрального угла: $\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right)$.

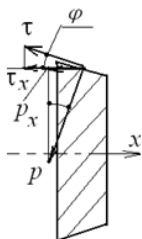


Рис. 3.6. Элемент очага деформации и схема сил.

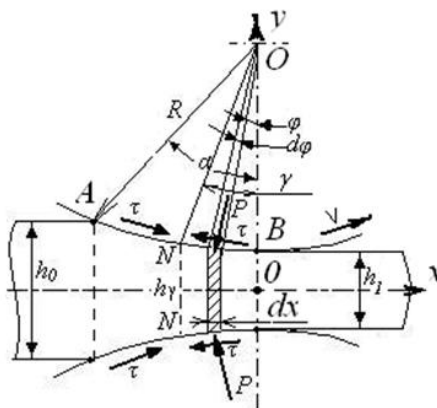


Рис. 3.7. Схема очага деформации к выводу уравнения равновесия

3.2.4. Опережение и отставание при прокатке

В зоне отставания металл движется медленнее валков, а в зоне опережения – быстрее. Для характеристики процессов опережения и отставания применяются показатели, носящие те же названия:

$$\text{- опережение} \quad S = \frac{c_1 - c}{c} = \frac{c_1}{c} - 1$$

$$\text{- и отставание} \quad S_{om} = \frac{c - c_0}{c} = 1 - \frac{c_0}{c} .$$

Здесь c_0, c_1 – скорости полосы на входе и выходе из валков, c – окружная скорость валков. Из условия постоянства секундного объема металла на входе и выходе имеем:

$$b_0 h_0 l_0 = b_1 h_1 l_1 .$$

Поделив на время прокатки, получим условие постоянства секундного объёма

$$b_0 h_0 c_0 = b_1 h_1 c_1 .$$

Из этих двух выражений получаем $l_1/l_0 = c_1/c_0 = \lambda$ и $c_0 = c_1/\lambda$.

Подставляем это в выражение для отставания и получаем

$$S_{om} = 1 - \frac{1+S}{\lambda}$$

Найдём связь опережения с параметрами очага деформации. Запишем условие постоянства объема для выходного и нейтрального сечений, в котором горизонтальная составляющая скорости полосы равна $c_\gamma = c \cdot \cos \gamma$:

$$b_\gamma h_\gamma \cdot c \cdot \cos \gamma = b_1 h_1 c_1 .$$

Из первого и последнего выражений получаем

$$S + 1 = \frac{c_1}{c} = \frac{b_\gamma h_\gamma \cdot \cos \gamma}{b_1 h_1}$$

Высота полосы в нейтральном сечении равна

$$h_\gamma = h_1 + \Delta h_\gamma = h_1 + D(1 - \cos \gamma) .$$

Подставляем в предыдущую формулу и, принимая отсутствие уширения в зоне опережения (оно там меньше, чем в зоне отставания), получаем **формулу Финка**

$$S = \frac{[h_1 + D(1 - \cos \gamma)] \cdot \cos \gamma}{h_1} - 1 = (1 - \cos \gamma) \left(\frac{D}{h_1} \cos \gamma - 1 \right)$$

Для малых углов α получим $s = \frac{\gamma^2}{2} \left[\frac{D}{h_1} \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \right) - 1 \right]$.
 Пренебрегая γ^4 как величиной малой ($\gamma \ll 1$ рад), получим **формулу С. Экулунда**:

$$s = \frac{\gamma^2}{2} \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right)$$

При листовой прокатке отношение D/h_1 всегда на два-три порядка больше единицы, поэтому приходим к формуле **А.Ф.Головина - Д.Дрездена**

$$s = \frac{D}{2h_1} \gamma^2$$

Опережение чаще всего оценивают в % ($S \cdot 100\%$), и для обычных процессов прокатки **тонких** листов и лент оно лежит в пределах **3 – 5 %**.

Последняя формула совместно с приведенной выше формулой И.М.Павлова для **нейтрального угла** дает возможность вычислять и анализировать величину опережения (**рис. 3.8**).

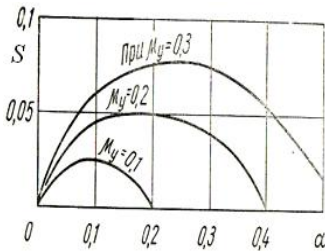


Рис. 3.8. Зависимость опережения от параметров прокатки.

3.3. Уширение при прокатке

Уширением называют увеличение ширины полосы при прокатке. Показатели и коэффициенты уширения рассмотрены выше. Как правило, уширение не желательно.

Наибольший интерес представляет уширение на средних очагах деформации применительно к технологическим процессам прокатки на сортовых станах.

В создании уширения при прокатке на средних очагах действуют два механизма. С одной стороны, металл скользит по поверхности валков в поперечном направлении, и чем меньше коэффициент трения, тем больше величина скольжения.

Скольжение осуществляется не по всей ширине контакта, а в прикромочных областях. В средней части по ширине находится зона прилипания (рис 3.9). Основное уширение, особенно при горячей прокатке, осуществляется при заторможенном поперечном скольжении на контакте по второму механизму уширения - за счет выхода боковой поверхности металла на контактную поверхность (рис.3.10). Теоретически и экспериментально показано, что ширина образца по длине очага деформации растёт по экспоненте, (рис.3.9). Качественно оценить уширение можно, разбив очаг деформации на зоны I и II (рис 3.9). В зонах I металл только уширяется, а в зонах II течёт только в длину. Величина уширения будет пропорциональна соотношению площадей этих зон. При уменьшении ширины очага относительно его длины относительная площадь зоны I увеличивается и растёт уширение Из -этой модели получен закон уширения:

$$\Delta b = C_b \cdot C_u \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \cdot f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)$$

Здесь коэффициенты учитывают влияние внешних зон и натяжение. По В.П. Калинину: $C_u = 1 - \frac{2\sigma_0}{K}$ где σ_0 – заднее натяжение; K – истинное сопротивление деформации.

По А.И. Гришкову: $C_b = 4(1-\varepsilon)(b_0/l-0,15) \cdot e^{1,5(0,15-b_0/l)} + \varepsilon$ где ε - степень высотной деформации.

Значение функции f зависит от принятых допущений, например, по С.И. Губкину:

$$f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \frac{\mu}{h_1}$$

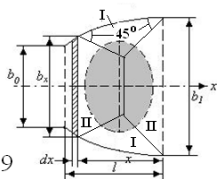


Рис. 3.9

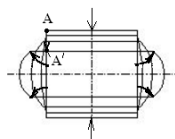


Рис. 3.10.

Рис. 3.9. Форма очага деформации в плане и зоны течения металла.

Рис. 3.10. Схема уширения при прокатке за счёт выдавливания средних слоёв

Различают три вида уширения: свободное (естественное), ограниченное (стесненное) и вынужденное.

Свободным называется уширение, когда поперечному течению металла ничто не препятствует, кроме сил контактного трения.

Ограниченное уширение имеет место, когда поперечное течение металла встречает какое-либо противодействие (например, создаваемое боковыми стенками калибра или вертикальными валками).

Вынужденное уширение обычно является следствием неравномерного обжатия полосы по ширине, когда вытяжке более обжимаемых участков полосы препятствуют менее обжимаемые, и металл вынужденно смещается поперечном направлении.

Уширение является одним из основных параметров прокатки, поскольку оно непосредственно влияет на точность, а, следовательно, и на качество проката, особенно сортового. Если толщину профиля можно достаточно точно выдержать путем регулирования зазора между валками, то точность профиля по ширине всецело зависит от уширения.

До настоящего времени для расчёта уширения используют эмпирические зависимости.

Наиболее совершенной является формула Чекмарева:

$$\Delta b = \frac{2K \cdot B \cdot \Delta h}{(H+h) \cdot \left[1 + (1+\alpha) \cdot \left(\frac{B}{l_d} \right)^n \right]}$$

где K – показатель вида уширения: при свободном *уширении он равен единице, при стесненном - 0,6...0,8*; n – *степенной показатель. Для узкого очага деформации, когда $B < l_d$, он равен единице, для широкого очага при $B > l_d$ – двум.*

3.3.1. Зависимость уширения от условий прокатки.

1. При увеличении обжатия и диаметра валков уширение возрастает.

2. Дробность деформации способствует уменьшению уширения.

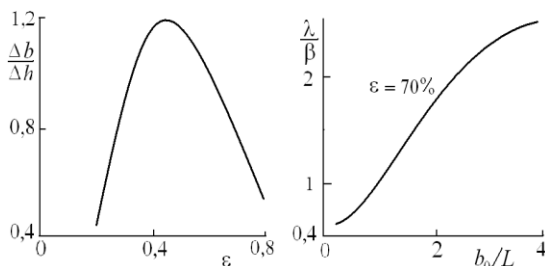
3. При увеличении ширины полосы уширение уменьшается. Поэтому при прокатке широких полос им вообще пренебрегают.

4. Увеличение коэффициента трения способствует росту уширения. Все факторы, влияющие на коэффициент трения, в таком же направлении влияют на уширение.

5. Повышение содержания углерода в стали приводит к уменьшению уширения. Уширение легированных сталей в 1,1...1,6 раза больше, нежели углеродистых.

На графиках (рис. 3.11) показана зависимость показателей уширения от параметров прокатки. Из условия постоянства объёма $\beta\lambda = \frac{h_0}{h_1} = 1 + \varepsilon$, поэтому рассмотрены варианты, когда степень деформации переменная и постоянная.

Рис. 3.11. Зависимость уширения от параметров прокатки



Лекция 6

3.4. Сила и давление металла на валки.

Сила прокатки является одним из важнейших показателей процесса прокатки. Она лежит в основе расчета рабочей клетки, передающих устройств, мощности электропривода и пр. По сути, она определяет тип и конструкцию прокатного стана. Под силой прокатки понимают равнодействующую P всех вертикальных составляющих элементарных сил нормального давления N и сил трения T , приложенных к металлу со стороны валков (рис. 3.12). Горизонтальные составляющие P_x и T_x взаимно уравновешивают друг друга, т.е. $P_x = T_x$, а вертикальные составляющие P_y и T_y в сумме дают силу прокатки $P = P_y + T_y$.

При установившемся процессе прокатки равнодействующая сила P направлена перпендикулярно оси полосы. В противном случае продольная составляющая силы P вызывала бы либо торможение, либо ускорение полосы.

Сила прокатки $P = p_c F$, где p_c — среднее нормальное напряжение (давление), которое было бы при условии его равномерного распределения по площади контактной поверхности, F — горизонтальная проекция площади контактной поверхности.

Контактное напряжение зависит от множества факторов,

учесть которые чрезвычайно сложно, особенно механические свойства стали.

Поэтому обычно используют или чисто экспериментальные способы, или аналитические, но с учетом экспериментальных значений механических свойств.

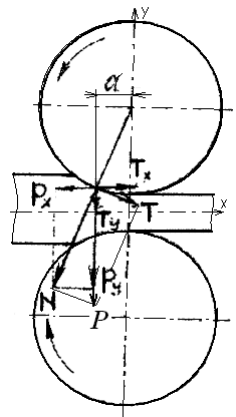


Рис. 3.12. Схема сил в очаге деформации

Экспериментальным путем измеряют силу прокатки, а уже по ней определяют среднее давление: $p_c = P/F$.

Точнее, измеряют не собственно силу, а упругие деформации месдоз или стоек станин клетки при прокатке, а уже по ним с использованием тарировочных кривых вычисляют силу прокатки.

Таким путем определяют силу и давление прокатки на действующих станах. Для проектируемых станов используют аналитические методы и эмпирические формулы.

Из эмпирических формул достаточно известна формула Экелунда:

$$\sigma_T = (14 - 0,01t) (1,4 + C + Mn + 0,3 Cr).$$

где $p_c = (\sigma_T + \eta u) \cdot (1 + m)$, кг/мм², Здесь C, Mn и Cr - содержание этих элементов в стали, %; t – температура; η - вязкость стали:

$$\eta = 0,01 (14 - 0,01t) K_V.$$

(здесь K_V - скоростной коэффициент. При $V < 6$ м/сек $K_V = 1$, при $V > 6$ м/сек $K_V = 0,8$); u - скорость деформации, с⁻¹;

$$m = \frac{1,6 f \sqrt{R \Delta h} - 1,2 \Delta h}{H + h}.$$

При аналитическом подходе к решению этой задачи один из возможных способов предложил А.И. Целиков. Контактное напряжение зависит от двух групп факторов.

Первая группа факторов учитывает природные свойства металлов, обычно отождествляемые с пределом текучести σ_T . Предел текучести имеет разные значения не только для разных металлов, но и для одного и того же металла в зависимости от температуры прокатки, степени и скорости деформации и пр. Вторая группа - учитывает влияние напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, выражаемое произведением $m \cdot n_\sigma$, где m - коэффициент Лодэ - учитывает влияние среднего главного напряжения и изменяется в пределах 1,0..1,15, а n_σ - влияние напряженного состояния металла в очаге деформации. Тогда

$$p_c = m \cdot n_\sigma \cdot \sigma_T.$$

Проф. В.С. Смирнов, используя положения теории размерностей, предложил определять m по следующим зависимостям:

$$m = 1 + \frac{f}{3} \cdot \frac{b_c}{h_c} \text{ при } 0 < \frac{b_c}{h_c} < \frac{0,465}{f} \text{ и } m = 1,15 \text{ при } \frac{b_c}{h_c} \geq \frac{0,465}{f}.$$

Второй член n_σ А.И. Целиков представил в следующем виде:

$$n_\sigma = n'_\sigma \cdot n''_\sigma \cdot n'''_\sigma,$$

где n'_σ - коэффициент, учитывающий влияние контактного трения;

n''_σ - коэффициент, учитывающий геометрические показатели очага деформации (фактор формы), от которых зависит величина внеконтактной деформации;

n'''_σ - коэффициент, учитывающий влияние натяжения полосы или подпора на давление.

$$n'_\sigma = 1 + K \frac{l_d}{h_c}, \text{ где } K \text{ равен } \frac{1}{6}, \frac{1}{5} \text{ или } \frac{1}{4} \text{ при } \frac{l_d}{h_c}$$

равном, соответственно, до 2, от 2 до 4 и более 4.

$$n'''_\sigma = \left(\frac{l_d}{h_c} \right)^{-0,4} \text{ при } \frac{l_d}{h_c} \leq 1,0 \text{ и } n'''_\sigma = 1,0 \text{ при } \frac{l_d}{h_c} > 1,0.$$

$$n_{\sigma}^m = 1 + \frac{\sigma_n + \sigma_3}{p_c},$$

где σ_n и σ_3 – напряжения в переднем и заднем концах полосы, создаваемые натяжением или подпором; p_c – давление при отсутствии натяжения или подпора.

При простом случае прокатки без натяжения $n_{\sigma}^m = 1$.

Третий член σ_T проф. В.И. Зюзин предложил определять с помощью базового сопротивления деформации $\sigma_{об}$ и термомеханических коэффициентов K_t , K_{ε} и K_u , учитывающих влияние, соответственно, температуры, относительного обжатия и скорости деформации:

$$\sigma_T = \sigma_{об} \cdot K_t \cdot K_{\varepsilon} \cdot K_u.$$

Базовые значения $\sigma_{об}$ для разных металлов определяют опытным путем при постоянных значениях ($t = 1000^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 10\%$, $u = 10 \text{ сек}^{-1}$) и сводят в таблицы.

Значения термомеханических коэффициентов для разных материалов определяют следующим образом: при фиксированных значениях $\varepsilon = 10\%$, $u = 10 \text{ сек}^{-1}$ определяют сопротивление деформации σ_T при разных температурах. По полученным значениям коэффициента $K_T = \sigma_T / \sigma_{об}$ строят график зависимости K_T от температуры.

Аналогичным образом определяют значения K_{ε} при разных обжатиях и фиксированных значениях $t = 1000^{\circ}\text{C}$ и $u = 10 \text{ сек}^{-1}$, а также K_u - при разных скоростях деформации при фиксированных значениях $t = 1000^{\circ}\text{C}$ и $\varepsilon = 10\%$.

При машинных методах расчета удобнее пользоваться не графиками, а следующими функциональными зависимостями для определения термомеханических коэффициентов.

$$K_t = A_1 \cdot e^{-m_1 t}, \quad K_{\varepsilon} = A_2 \cdot \varepsilon^{m_2}, \quad \text{и} \quad K_u = A_3 \cdot u^{m_3},$$

где $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ – экспериментальные показатели для разных металлов, e – основание натурального логарифма.

Тогда $\sigma_T = \sigma_{од} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot e^{-m_1 t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot u^{m_3}$.

Таким образом, определив значения τ , n_σ и σ_T , находят давление прокатки, а по нему - силу прокатки, по которой производят прочностные расчеты рабочей клетки, валков, нажимных устройств и пр.

В настоящее время для расчёта давления и силы прокатки широко применяют **численные методы расчёта**, например, с использованием МКЭ – метода конечных элементов. Существуют также аналитические формулы для расчёта в простейших случаях прокатки (плоская прокатка без уширения, например). Широко известны формулы Целикова, Королёва, Полухина, Смирнова В.С., Василёва и др. авторов.

3.5. Момент и мощность прокатки

Момент прокатки можно определять экспериментальным или аналитическим путем. В первом случае обычно на шпиндели наклеивают проволочные датчики, по упругим деформациям которых и тарировочным кривым определяют крутящий момент прокатки на валу приводного двигателя.

По втором случае момент прокатки M_n определяют по найденным значениям силы прокатки.

$$M_n = M_d + M_T + M_x \pm M_{дин},$$

где M_d - момент, расходуемый на пластическую деформацию и преодоление контактных сил трения;

M_T - момент, расходуемый на преодоление сил трения в подшипниках валков, шестерённой клетки и пр.;

M_x - момент холодного хода, расходуемый на работу главной линии стана в холостом режиме;

$M_{дин}$ - момент, расходуемый на преодоление инерционных сил в период разгона и торможения двигателя (со знаком + при разгоне, со знаком - при торможении). Учитывается только на реверсивных станах.

Момент деформации для двух валков будет $M_d = 2Pa$, где a - плечо приложения равнодействующей силы (рис. 3.12). Обычно плечо силы выражают через коэффициент плеча $\psi = \frac{a}{l_d}$. Тогда

$$M_d = 2P\psi l_d.$$

Коэффициент плеча при горячей прокатке изменяется в пределах 0,4...0,6, а при холодной - 0,25...0,35. Для его определения в конкретных условиях прокатки предложены следующие формулы:

- формула Чекмарева для горячей прокатки

$$\psi = 0,790 - 0,887 \frac{l_d}{h_c} + 0,444 \left(\frac{l_d}{h_c} \right)^2$$

- и формула Сафьяна и Мелешко - для холодной.

$$\psi = 0,498 - 0,0283 \frac{l_d}{h_c}$$

Момент трения в шейках валков $M_T = 4T \frac{d}{2}$, где d - диаметр шейки рабочих валков. Сила трения $T = \frac{P}{2} \cdot f$. Тогда $M_T = P \cdot f \cdot d$, где f - коэффициент трения в подшипниках. Для подшипников скольжения $f = 0,01..0,03$, для подшипников качения и жидкостного трения $f = 0,003$.

С учетом потерь на трение в других узлах стана

$$M_T = P \cdot f \cdot d \cdot \eta, \text{ где } \eta = 1,0..2,0.$$

Момент холостого хода можно принять в пределах 3-5% от суммы моментов

$$M_0 \text{ и } M_T, \text{ т.е. } M_T = (0,03..0,05)(M_0 + M_T).$$

Динамический момент $M_{дин} = \frac{GD^2}{375} \cdot c$, где GD^2 - суммарный маховый момент вращающихся частей главной линии стана; c - показатель, характеризующий ускорение или замедление двигателя. При ускорении $c = 30..40$ об/мин. сек, при замедлении $c = 60..70$ об/мин. сек.

Маховый момент $GD^2 = GD_в^2 + GD_я^2$, где $GD_в^2$ - маховый момент рабочих валков, шпинделей и пр., $GD_я^2$ - маховый момент якоря двигателя. Обычно $GD_в^2 \approx 0,1 \cdot GD_я^2$.

Тогда $GD^2 = 1,1 \cdot GD_я^2$. Значения $GD_я^2$ - паспортные данные двигателя.

Мощность $N_n = M_n \cdot \omega$, где ω - угловая скорость вращения валков, $\omega = \frac{V}{R}$.

$$\text{Тогда } N_n = M_n \cdot \frac{V}{R} \text{ МН*м/сек (МВт)}.$$

Мощность двигателя $N_d = \frac{N_n \cdot K}{C \cdot i}$, где K - скоростной коэффициент, учитывает снижение мощности двигателя вследствие ослабления магнитного потока при частоте вращения валков n выше номинальной n_n (паспортные данные):

$$K = \frac{n}{n_n}$$

При $n < n_n$ $K=1$.

C - коэффициент временной перегрузки двигателя. Для нереверсивных двигателей $C=2,0$, для реверсивных $C=2,5 \dots 3,0$;

i - КПД передачи M_n от двигателя к валкам. При наличии шестеренной клетки в главной линии стана $i=0,9$, при отсутствии - $i=0,95$.

Мощность приводных двигателей изменяется в широких пределах для разных станов, от нескольких киловатт на лабораторных станах до 6...12 мегаватт на обжимных станах.

Глава 4. Сортамент и стандартизация прокатной продукции

Прокатные изделия с определенной формой поперечного сечения называются профилем проката. Например, круглый профиль, квадратный профиль. Для более сложных профилей кроме формы в это понятие включают один - два основных размера. Например, полоса шириной 200 мм, равнобокий угольник 75x75 мм (рис. 4.1 поз. 4, 5а). Кроме понятия профиль различают понятие профилеразмер, который кроме одного - двух основных размеров профиля

учитывает дополнительные размеры, уточняющие его характеристику. Например, тот же угловой профиль 75x75 мм может иметь различную толщину полок - 5, 6, 7, 8, и 9 мм. С учетом толщины это уже будут профилеразмеры, т.е. профиль один, а профилеразмеров пять.

Для заготовок, простых профилей (круг, квадрат и т.п.) профиль определяется формой поперечного сечения, а профилеразмер - диаметром или стороной квадрата. Так, круглый профиль один, а профилеразмеров от 5 до 250 мм - более ста.

Профиль полосы определяют форма поперечного сечения и его ширина, а профилеразмер - толщина полосы при данной ширине. Для двутавровых балок и швеллеров понятие профиль включает форму поперечного сечения и его высоту, а профилеразмер (или литерный профиль) - *разную ширину полок*.

Совокупность профилей и профилеразмеров прокатных изделий называется сортаментом проката. Он насчитывает тысячи

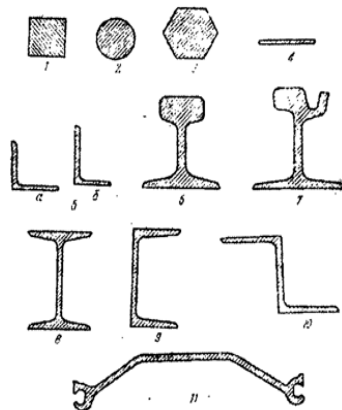


Рис. 4.1. Некоторые виды поперечных профилей проката: 1 – квадратный; 2- круглый; 3 – шестигранный; 4 – полосовой; 5 – угловой; 6, 7 – рельсы железнодорожный и трамвайный; 8 – двутавр; 9 – швеллер; 10 – зетовый; 11 – шпунт.

наименований самой разной формы и размеров. И это только размерный сортамент. Но прокатные изделия отличаются еще и марочным (химическим) составом, а их начитывается более 800.

подавляющее большинство профилей проката стандартизовано, т.е. поставляются по стандартам. Различают три уровня стандартизации – государственный, отраслевой и на уровне предприятий и ведомств.

Государственные стандарты (ГОСТ) содержат требования, обязательные для соблюдения на любых предприятиях всех форм собственности на территории страны. Утверждаются на государственном уровне.

Отраслевые регламентируют требования к прокату, обращаемого внутри отрасли.

На уровне предприятий и ведомств действуют технические условия на размерный и марочный состав проката. Разрабатываются и утверждаются на уровне заинтересованных предприятий и организаций. Технические условия в основном разрабатывают на новые виды проката, которые отсутствуют в государственном стандарте.

Государственные стандарты подразделяют на **сортаментные и на марки стали и технические требования.**

В сортаментных стандартах регламентированы форма и размеры поперечного сечения профиля и его отдельных элементов, длина профиля, допускаемые отклонения от номинальных размеров, форма проката (серповидность, плоскостность, волнистость и пр.), масса одного погонного метра и т.д. Для проката, используемого для сооружений со сложными условиями нагружения, дополнительно указывают момент сопротивления, момент и радиус инерции и др.

ГОСТы на марки стали и технические требования регламентируют химический состав, группы и категории сталей, механические свойства, макро- и микроструктуру, состояние поверхности, вид термообработки и другие качественные показатели, а также правила приемки, методику испытаний, маркировку, упаковку и оформление документации на отгружаемую продукцию. Основными марочными стандартами, по которым производят более 80% проката, являются ГОСТ 380-94

«Сталь углеродистая обыкновенного качества» и ГОСТ 1050 «Сталь углеродистая качественная».

Несмотря на разнообразие сортамента прокатных изделий, в зависимости от формы поперечного сечения его подразделяют на четыре основные группы: сталь сортовая, сталь листовая, трубы и прочие виды проката.

4.1. Сортовая сталь

Наиболее разнообразным по форме и количеству профилируемых является сортament сортовой стали. Сортанные профили можно использовать и как готовые изделия, и как заготовки для последующей обработки. Их классифицируют по ряду признаков: по размеру, по форме, по назначению.

По размерам различают сталь:

- крупносортную (диаметр круга > 80 мм, двутавровые балки и швеллеры выше № 16, железнодорожные рельсы и пр.);
- среднесортную (диаметр круга 40...80 мм, двутавровые балки и швеллеры до № 16, рудничные рельсы и пр.);
- мелкосортную (диаметр круга 10...40 мм и др.);
- катанку (диаметр круга 5...9 мм).

По форме сортанные профили подразделяют на простые и сложные или фасонные (рис. 4.1).

К простым относятся профили, у которых касательная к любой точке периметра поперечного сечения не пересекает это сечение. Сюда относят прокат круглого, квадратного, шестигранного, прямоугольного сечения, полосовую, штрипсовую сталь и др.

Государственными стандартами предусмотрены круглые профили диаметром 5...250 мм, квадратные - со стороной квадрата 5-250мм, шестигранные с диаметром вписанной окружности 8...100 мм, полосовые шириной 10...200 мм и толщиной 4...60 мм, штрипсовые шириной 65...415 мм и толщиной 2,27...5,0 мм и др.

Государственными стандартами предусмотрены разнобокие уголки с полками 20...250 мм, неравнобокие - 25/16...250/160 мм,

балки двутавровые высотой 100...700 мм и широкополочные высотой до 1100мм, швеллеры высотой 50...400 мм, рельсы железнодорожные массой 38, 43, 50, 65 и 75 кг/п.м (погонный метр), рельсы рудничные массой 8, 11, 15, 18, 24 и 33 кг/п.м и др.

По назначению сортовые профили подразделяют на профили: общего назначения, отраслевого назначения и специального назначения.

Профили общего назначения используют в самых разных целях, в самых разных отраслях народного хозяйства. Это круги, квадраты, полосы, уголки, балки, швеллеры и пр.

К профилям отраслевого назначения относятся профили, специфичные для данной отрасли: рельсы трамвайные, железнодорожные и рудничные, шпунтовые сваи, профили для сельскохозяйственного, транспортного, горного машиностроения.

Профили специального назначения предназначены для конкретных изделий, а уже сами эти изделия могут быть использованы в самых разных отраслях. Это, например, круглая или шестигранная пустотелая сталь для изготовления буров, профили трехгранные, овальные и пр. для инструмента (напильников, рашпилей и т.п.), желобчатые профили для рессор транспортных средств и т.д.

Следует отметить, что четкой грани между профилями отраслевого и специального назначения нет. Те же железнодорожные рельсы можно рассматривать как специальный профиль для прокладки пути, а их можно использовать и на транспорте, и в строительстве, и в портовых сооружениях и т.д.

4.2. Плоский прокат

Листовая сталь является одним из наиболее эффективных видов проката. Изделия, получаемые из листового материала штамповкой или сваркой, значительно дешевле и качественнее, чем, например, литые. Прокат получают путем горячей, теплой или холодной прокатки на прокатных станах. В результате получают следующие виды плоского проката: горячекатаные рулоны; горячекатаный лист; холоднокатаные рулоны; холоднокатаный лист; черная жечь; холоднокатаная лента, фольга.

Горячекатаную листовую сталь различают по толщине, назначению, точности, плоскостности и состоянию кромок.

По толщине листовую сталь делят на два вида: тонколистовую толщиной до 4 мм и толстолистовую толщиной 4 мм и более. Кроме того, в сортаменте толстолистовой стали выделяют ещё плиты толщиной свыше 50 мм и брамы толщиной свыше 250 мм. По ГОСТ 19903 размеры листовой стали колеблются по толщине от 0,5 до 160 мм и по ширине от 500 до 3800 мм, рулоны толщиной от 1,2 до 12 мм.

По назначению различают листовые стали: котельную, броневую, судостроительную, мостовую, электротехническую, инструментальную и пр.

По точности горячекатаную листовую сталь делят на высокоточную и нормальной точности.

По плоскостности - на полосы особо высокой плоскостности (ПО); высокой плоскостности (ПВ); улучшенной плоскостности (ПУ) и нормальной плоскостности (ПН).

По состоянию кромок различают листы с катаными (необрезными) и обрезными кромками.

Кроме того, горячекатанная листовая сталь может быть с травленной или не травленной поверхностью.

4.3.Трубы

Трубы тоже являются одним из важных видов прокатной продукции. Об этом свидетельствует хотя бы тот факт, что в государственных планах и статистической отчетности трубы учитываются отдельной строкой. В общем объёме выпускаемого проката трубы составляют 15-20%, число профилеразмеров - около 18 000. Диапазон диаметров трубчатых профилей достаточно широк - от 0,5 до 2420 мм с толщиной стенки от 0,1 до 75 мм.

По способу производства трубы подразделяют на сварные (шовные) и бесшовные. Сварные трубы в свою очередь делят на спиральношовные и прямошовные диаметром от 8 до 2420 мм с толщиной стенки 0,5...32 мм.

Спиральношовные грубы более технологичны и экономичны: трубы одного диаметра можно получать из заготовки (полосы) разной ширины и, наоборот, трубы разных диаметров можно получать из полосы одной ширины.

Прямошовные трубы большого диаметра (более 1200 мм) вынуждено производят двушовными из-за отсутствия в сортаменте листов нужной ширины.

Бесшовные трубы производят путем прокатки или прессования. Прессуют в основном трубы из цветных материалов, а также из труднодеформируемых сплавов. Сортамент бесшовных труб: диаметр 25...665 мм, толщина стенки 2,5...75 мм. Трубы меньших диаметров и толщин получают холодной прокаткой.

По назначению трубы подразделяются на газо-, нефте- и водопроводные, насосно-компрессорные, обсадные, бурильные, шарикоподшипниковые и пр.

Кроме привычной круглой формы трубы бывают квадратные, прямоугольные, полукруглые, оребренные и специального назначения (рис. 4.2).

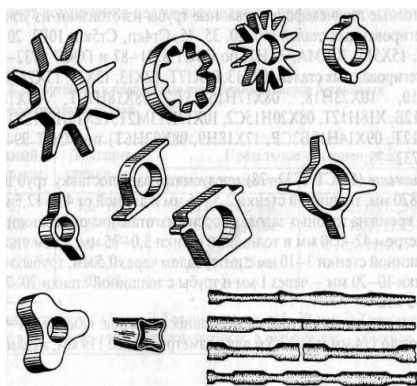


Рис. 4.2. Виды поперечных и продольных сечений труб

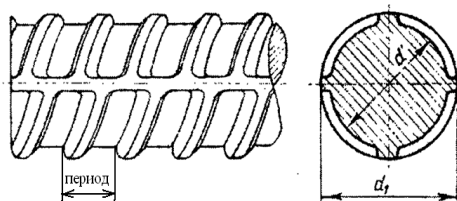


Рис. 4.3. Профиль периодического сечения - арматурная сталь

4.4. Прочие виды проката

К прочим видам проката относят преимущественно специальные профили: гнутые сортовые профили из листового материала, трубчатые и др. - которые, как отмечено ранее, предназначены для вполне конкретных изделий, а уже сами изделия могут быть использованы в самых разных отраслях. Это цельнокатанные колеса, бандажи, поворотные круги, периодический прокат (рис. 4.3), биметаллы разного назначения, зубчатые колеса, оси, помольные шары и многое другое. Сортамент подобных профилей настолько широк (несколько десятков тысяч), что учесть его практически невозможно. Получают их с использованием всех видов обработки металлов давлением.

Лекция 7

Глава 5. Оборудование прокатных станов

5.1. Виды технологических операций, выполняемых на прокатных станах

Комплекс машин и механизмов для получения изделий методом прокатки и их обработки в потоке называется прокатным станом.

Из этого определения следует, что помимо основной операции - пластического формообразования раската, на стане выполняют и ряд других.

В теории организации производства отдельные операции, необходимые для осуществления технологического процесса, подразделяют на основные, сопутствующие и вспомогательные. В соответствии с этим различают основное, сопутствующее и вспомогательное оборудование.

Применительно к прокатке к основным относятся операции по осуществлению пластической деформации металла, т.е. собственно прокатку, и, соответственно, к основному оборудованию относят прокатную клеть, электропривод *и передаточные устройства*.

К сопутствующим относят операции, в процессе которых может изменяться физическое состояние и/или размеры раската, но без изменения формы и площади поперечного сечения. Это нагрев, охлаждение, порезка на мерные длины, правка, зачистка проката и пр. И, соответственно, оборудование: нагревательные устройства, холодильники, правильные машины, средства порезки, отделки и пр.

К вспомогательным относятся операции, при которых не изменяется ни форма, ни размеру, ни физическое состояние прокатываемого металла. Это операции и соответствующее оборудование для продольного и поперечного перемещения раскатов (рольганги, шлепперы, грузоподъемные механизмы) их кантовки и клеймения, смотки в бунты и рулоны, обвязки проката, перевалки валков и пр. В обиходе, однако, сопутствующие и вспомогательные операции и оборудование обычно именуют вспомогательными.

5.2 . Основное и вспомогательное оборудование прокатных станов.

5.2.1. Главная линия прокатного стана

Линия, на которой расположено основное оборудование, называется главной (рабочей) линией прокатного стана (рис.5.1). Основными ее элементами являются: рабочая клеть с валками (1), шпиндели с муфтами (2), шестерённая клеть (3), коренная муфта (4), редуктор (6), главная (моторная) муфта (7) и двигатель (5).

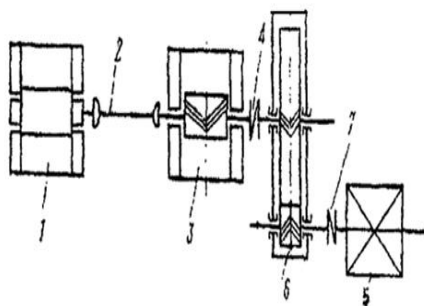


Рис. 5.1. Схема главной линии прокатного стана

Для передачи вращения от двигателя к рабочим валкам непосредственно или через редуктор и шестеренную клеть, - служат муфты и шпиндели. Используют пружинные, зубчатые, трефовые и др. муфты. При большом перекосе ($10... 12^\circ$) используют универсальные шпиндели.

5.2.2. Рабочая клеть

Рабочая клеть состоит из двух станин, валков с подшипниками, механизмов для установки и фиксирования положения валков в вертикальной и горизонтальной плоскостях, валковой арматуры, устройств для смазки и охлаждения валков.

Станины открытого или закрытого типов двутаврового или прямоугольного сечения (рис. 5.2) отливают из стали **марок 30...35Л**.

Станины закрытого типа изготавливают в виде цельной рамы. Они выдерживают большие усилия прокатки, но менее удобны в эксплуатации: затруднена перевалка валков, диаметр валков ограничен шириной окна.

Станины открытого типа разборные (скреплены сверху шпильками). Они менее жёсткие, но удобнее для перевалки валков.

Прокатные валки - основной деформирующий инструмент - работают в жёстких условиях: резкие теплосмены, большие давления, абразивное трение. Поэтому они должны быть не только высокопрочными, но и термо- и износостойкими.

По материалу валки подразделяются на стальные (литые или кованные) и чугунные. Стальные валки обладают достаточно высокой прочностью и пластичностью, поэтому их используют в клетях, испытывающих большие усилия прокатки. Чугунные валки менее прочные, но более износостойкие, чем стальные. Поэтому чаще их используют в предчистовых и чистовых клетях.

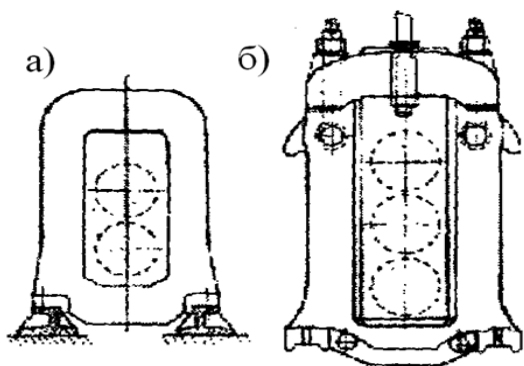


Рис. 5.2. Станины рабочих клетей, а) закрытая; б) открытая

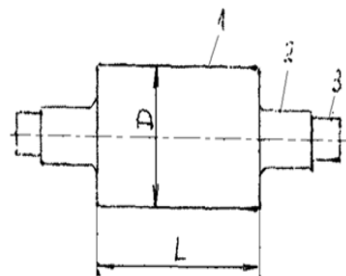


Рис. 5.3. Рабочий валок прокатного стана

Материалом валков служат углеродистые, низколегированные и легированные стали (сталь 50...55, 50...60ХН, 9ХФ и др.), легированные и нелегированные чугуны (СШХН-60, ЛПХН-60 и др.). Буквы С, Л обозначают сортовые и листовые валки; Ш, П - чугун с шаровидным или пластинчатым графитом; Х, Н - легированные хромом и никелем, соответственно; 60 – твердость, единиц по Шору.

Валки (рис. 5.3.) состоят из бочки (1) диаметром D и длиной L , двух опорных шеек (2) и хвостовиков (3). Твёрдость бочки валка различная для холодной и горячей прокатки и зависит от твёрдости прокатываемого металла. Шейками валок опирается на подшипники, а хвостовик предназначен для передачи момента прокатки от двигателя.

Размеры и количество валков в клети определяют тип клети и прокатного стана. Сортные станы характеризуются номинальным диаметром бочки валка (например, стан 280), а листовые - ее длиной (например, стан 3600).

Если сортовой стан состоит из нескольких клеток с разными диаметрами валков, тип стана обычно определяют по валкам чистовой клетки.

При завалке в клетку и в процессе эксплуатации положение валков необходимо регулировать. Для этого служат механизмы установки валков. К ним относятся нажимное устройство, уравнивающее устройство и устройство для регулирования положения валков в осевом направлении.

Нажимное устройство служит для регулирования положения валков в вертикальной плоскости.

Во избежание зазоров в системе валков - нажимное устройство, которые являются причиной динамических ударов при захвате полосы валками подушки верхнего валка должны быть постоянно прижаты к нажимному винту. Для этого служат уравнивающие устройства. У клеток с ручным нажимным устройством это пружина; у клеток с механическим или гидравлическим приводом нажимного устройства - грузовое или гидравлическое уравнивающее устройство.

Осевое регулирование валков чаще осуществляют болтами в стойках станины, проходящими через специальные планки или фланцы подушки.

По количеству и расположению валков в клетке различают:

- Двухвалковые (дуо) клетки (см. рис. 1.1). Широко используют в реверсивном и нереверсивном режимах.

-Трёхвалковые (трио) клетки, сортовые (5.4 а) и листовые (рис. 5.4; б). Используют для прокатки заготовок, сорта и листов.

-Двойные двухвалковые клетки (двойное дуо). Редко используют, в основном для прокатки мелкого сорта из легированных сталей (рис. 5. 5).

- Четырёхвалковые клетки (кварто). Используют в основном в листовом производстве (рис. 5.6). Рабочие валки (2) меньшего диаметра, опорные (1) - большего для повышения жесткости системы.

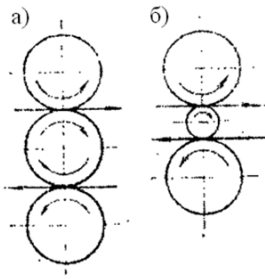


Рис. 5.4 – Расположение валков в клетии трио: а) сортового стана, б) листового стана (трио Лаута)

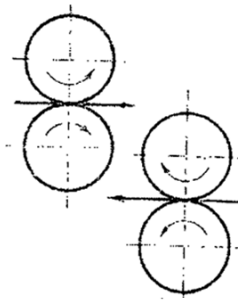


Рис. 5.5. Расположение валков в клетии двойное дуо

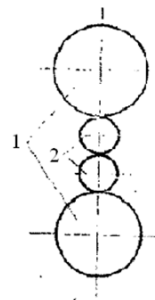


Рис. 5.6. Расположение валков в клетии кварто

- Шестивалковые клетии (рис. 5.7) используются редко. Вариант расположения валков - в одной вертикальной осевой плоскости. Приводные валки рабочие.

- Многовалковые клетии: 12 - ти и 20 - ти валковые. Используют для прокатки тончайших полос (фольг) (до 2 мкм) в рулонах (рис. 5.8, 5.9). Диаметр рабочих валков до 50 мм. Приводными являются опорные валки.

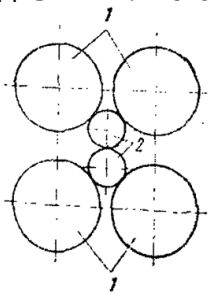


Рис. 5.7. Расположение валков в шестивалковой клетии

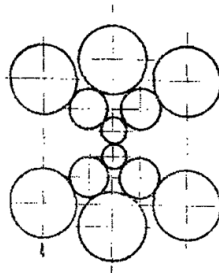


Рис. 5.8. Расположение валков в двенадцативалковой клетии

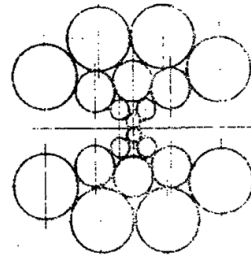
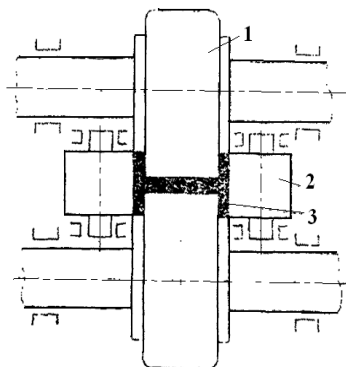


Рис. 5.9. Расположение валков в двадцативалковой клетии

- Универсальные клетии - для прокатки листов кроме горизонтальных валков оснащают двумя вертикальными приводными валками; для прокатки широкополочных балок 3 холостые вертикальные валки 2 располагают в одной вертикальной плоскости с горизонтальными 1 (рис.5.10).

Рис. 5.10. Расположение валков в универсальной балочной клетке



5.2.3. Вспомогательное оборудование

Для порезки проката на мерные длины, удаления концов и пр. используют гильотинные и дисковые ножницы (рис.5.11), дисковые пилы салазкового или маятникового типов, летучие ножницы и пр.

В качестве нагревательных устройств используют колодцы, методические и кольцевые печи, печи с выкатным подом и др.

Транспортные средства для передачи заготовок и раскатов по технологической цепочке представлены слитковозами и передаточными тележками, рольгангами, электромостовыми кранами, шлеперами и пр. Транспортные средства по массе составляют 40...60% от массы механического оборудования прокатного стана.

Правку проката осуществляют в роликотправильных машинах с прямо или косорасположенными валками (рис. 5.12). В машине с косорасположенными валками круглый прокат вращается и правится в двух плоскостях.

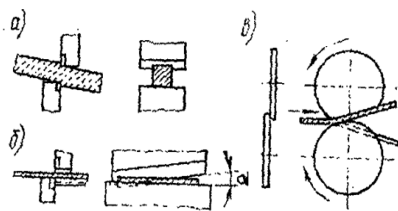


Рис. 5.11. Схема расположения ножей в ножницах: а) с параллельными ножами; б) с наклонным ножом; в) дискового типа.

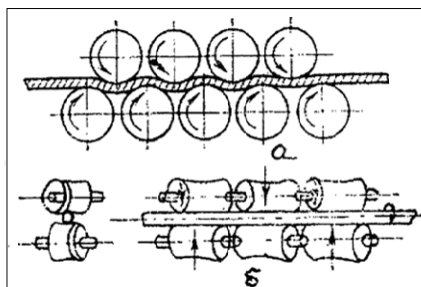


Рис. 5.12. Схема правки полосы в прямо- (а) и косорасположенных валках (б)

5.3. Типы прокатных станов

Прокатные станы классифицируют по следующим признакам: по режиму работы, по назначению, по количеству и расположению валков в клети, по количеству и расположению клетей.

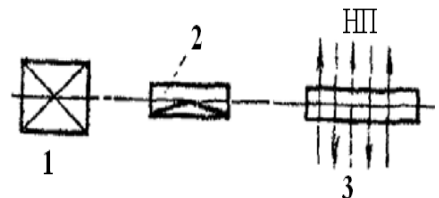
По режиму работы прокатные станы делятся на нереверсивные (частота и направление вращения валков постоянные) и реверсивные (прокатку осуществляют в прямом и обратном направлении за счет изменения направления вращения валков). Ко вторым относят блюминги, слябинги, заготовочные и толстолистовые станы.

По назначению станы подразделяются на станы для производства полупродукта и станы для производства готового проката. К первым относят блюминги, слябинги, заготовочные станы. Ко вторым относят:

- рельсобалочные станы (диаметр валков 750-900 мм);
- крупносортные станы (500-700 мм);
- среднесортные станы (350-500 мм);
- мелкосортные станы (250-330 мм);
- проволочные станы (150-280 мм);
- штрипсовые станы (300-400 мм);
- толстолистовые станы (длина бочки валков до 5500 мм);
- широкополосные станы горячей прокатки (до 2500 мм);
- широкополосные станы холодной прокатки (до 2800 мм);
- универсальные полосовые станы (до 2000 мм);
- трубные станы разных типов;
- прочие станы (колесо-бандажные, осепрокатные, шаропрокатные и др.)

По количеству и расположению клетей прокатные станы подразделяются на одно- и многоклетьевые. Одноклетьевые: блюминги, слябинги, листопрокатные, обжимо-заготовочные и пр. станы (рис. 5.13).

Рис 5.13. Схема одноклетьевого прокатного стана: 1 – двигатель; 2- шестерённая клетя; 3 - рабочая клетя: НП – направление прокатки



Многоклетьевые станы : линейного типа, непрерывные, полунепрерывные и с последовательным расположением клетей.

Станы линейного типа (рис. 5.14) используют для прокатки заготовок мелко-, средне- и крупносортовых профилей. Недостатком таких станов являются большие затраты ручного труда, низкие скорости прокатки и производительность. Частично этих недостатков можно избежать размещением клетей в несколько линий (рис.5.15).



Рис. 5.14. Схема линейного прокатного стана: 1 - двигатель, 2- редуктор; 3 - шестеренная клетя; 4, 5, 6 - рабочие клетки

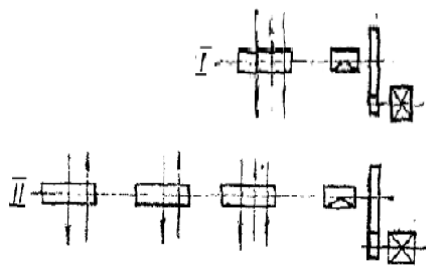


Рис. 5.15. Схема двухлинейного прокатного стана

Более совершенными являются непрерывные станы с клетями расположенными друг за другом (рис. 5.16). Такие станы работают по принципу: «в каждой клетке - один проход». Раскат одновременно может находиться в нескольких клетях. Поэтому необходимо соблюдать **правило** так называемых **секундных объемов**, т.е. через каждую клетку в единицу времени должно проходить одинаковое количество металла

$V_1 \cdot F_1 = V_2 \cdot F_2 = \dots = V_n \cdot F_n = const$, где V и F - скорости и площади поперечного сечения раската по клетям, соответственно. При нарушении этого условия между клетями могут возникнуть растяжение раската или порыв. Поэтому в непрерывном режиме катают преимущественно простые профили. Принцип непрерывной прокатки используют на непрерывных заготовочных станах, средне - и мелкосортных, проволочных, штрипсовых станах, широкополосных станах горячей и холодной прокатки листов и пр.



Рис. 5.16. Схема непрерывного прокатного стана

Для прокатки более сложных профилей применяют полунепрерывные станы и станы с последовательным расположением клетей. Полунепрерывные станы используют для прокатки мелкого сорта. Они сочетают непрерывную черновую и линейную чистовую группы клетей (рис. 5.17).

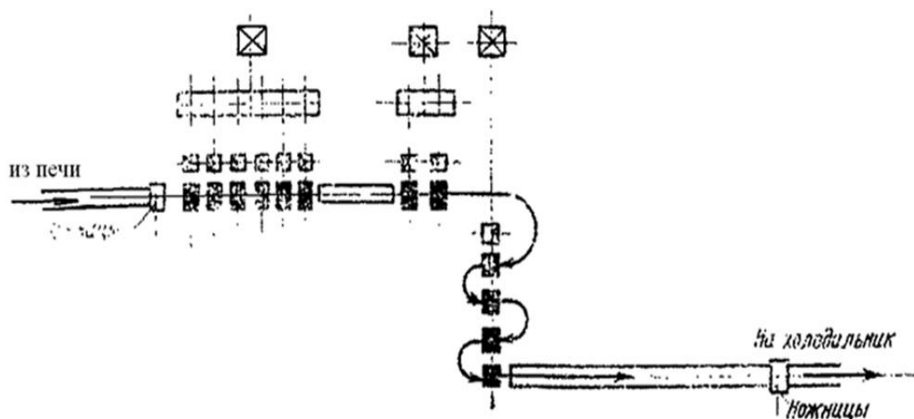


Рис. 5.17. Схема полунепрерывного прокатного стана

У станов с последовательным расположением клетей (рис. 5.18) черновая группа может быть непрерывной, а последующие клетки расположены друг за другом на расстоянии, превышающим длину раската. Для сокращения общей длины стана клетки располагают в нескольких параллельных линиях. В этих клетях отпадает необходимость соблюдать правило секундных объемов. Такие станы используют в основном для прокатки среднего и крупного сорта.

Разновидностью таких станов является стан с шахматным расположением клеток (рис. 5.19).

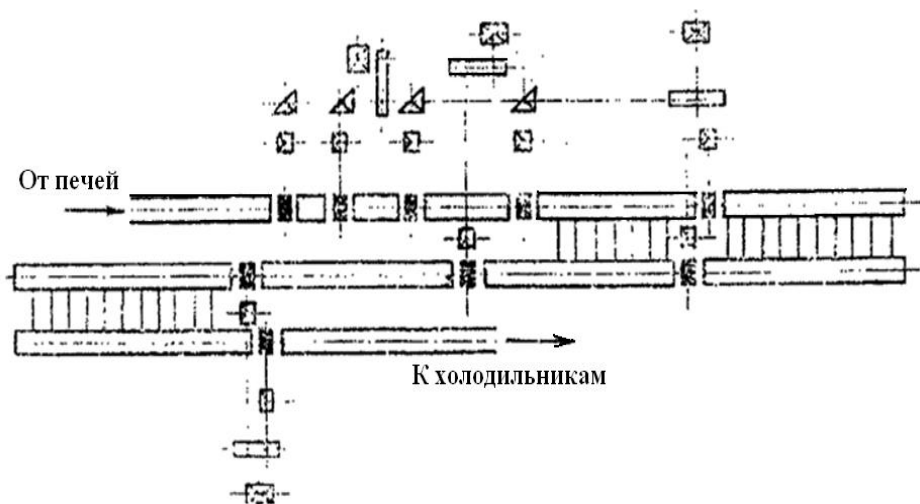


Рис. 5.18. Схема стана с последовательным расположением клеток на параллельных линиях

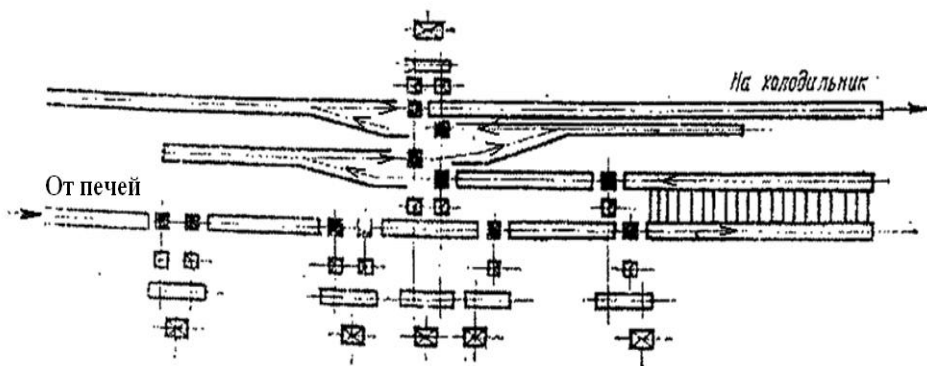


Рис. 5.19. Схема шахматного стана

Лекция 8

Глава 6. Волочение металлов

Волочение -- один из древнейших способов ОМД. Сущность его заключается в протягивании нахолодно прутка через отверстие (очко, волоку), выходные размеры которого меньше размеров исходного сечения заготовки (см. рис. 1.4). Способ широко используется в металлургии и металлообработке.

Сортамент получаемых изделий включает профили диаметром от нескольких микрон до 100 мм не только круглого, но и самых экзотических форм сплошного или полого сечения из благородных, цветных и черных металлов и сплавов.

Если преследуют только цель повышения точности и улучшения качества поверхности изделия, то такой вид волочения называют калибровкой.

Степень деформации при волочении ограничивается силой волочения, которая не должна вызывать появление напряжений в переднем конце, превышающих $0,5...0,7$ предела текучести данного металла. Поэтому единичные вытяжки при волочении составляют всего $1,2...1,3$ и редко достигают $1,5$.

Сила волочения в большой мере зависит от коэффициента трения. Для его снижения используют смазки (например, мыльная стружка с различными наполнителями). Большой эффект дает использование роликовых волок вместо монолитных, но из-за сложности их применяют редко, хотя коэффициент вытяжки в таких волоках может достигать $4...5$.

Обычно волока состоит из двух деталей - обоймы и собственно волоки (рис. 6.1). Обойму изготовляют из прочной вязкой стали, а волоку из твердосплавных материалов. Для волочения тончайшей проволоки волоки изготовляют из технических алмазов, а для волочения прутков и труб больших сечений - из инструментальных сталей.

Волока состоит из нескольких участков (рис. 6.1). Средний участок – рабочая или деформирующая зона. Имеет коническую

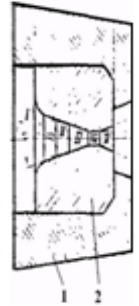


Рис. 6.1. Разрез волоки: 1 - обойма, 2 – волока

форму. Со стороны входа к ней примыкает смазочная зона тоже конической формы, а с другой стороны калибрующий пояс, который придает окончательную форму профилю. К смазочной зоне примыкает входная зона, а к калибрующему пояску – выходная зона конической или сферической формы. Угол рабочего конуса (2а) принимают равным $8...24^\circ$, смазочной зоны $-20...60^\circ$, а входной и выходной зон $-60...90^\circ$. Длина рабочего конуса составляет $0,5...0,7$, а длина калибрующего пояска $-0,3...1,0$ от диаметра получаемого профиля.

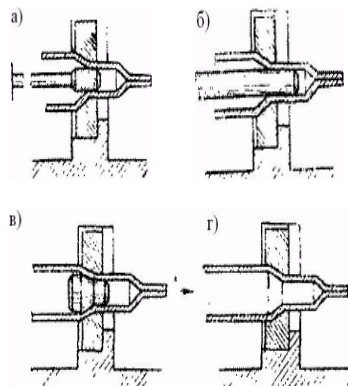


Рис. 6.2 - Способы волочения труб: а - на короткой оправке; б - на длинной оправке; в - на «плавающей» оправке; г - без оправки

Полые изделия волочат несколькими способами (рис. 6.2): на короткой неподвижной оправке, на длинной подвижной оправке, на короткой «плавающей» оправке и без оправки.

Усилия волочения определяют или опытным путем с помощью силоизмерительных приборов (например, динамометров), или аналитически.

6.1. Волочильные станы.

Основные элементы – волочильный инструмент и тянущее устройство. Используют два основных типа станов: с прямолинейным движением протягиваемого металла (цепные, реечные, гидравлические) и с наматыванием на барабан (барабанные станы).

Первые используют для профилей, которые невозможно смотать из-за их размеров или формы.

Цепной стан состоит (рис. 6.3.) из станины 3, бесконечной цепи 2, тележки с захватом 4, стойки для крепления волок 5, двигателя с передаточными устройствами 1.

На современных станах можно одновременно протягивать до 10 прутков со скоростью до 2 м/сек., тянущее усилие до 1,5 МН.

Длина изделий ограничивается размерами станины и обычно составляет до 15 м (максимум до 50 м).

Барабанные станы в зависимости от количества волок, через которые последовательно протягивают металл, подразделяют на однократные и многократные.

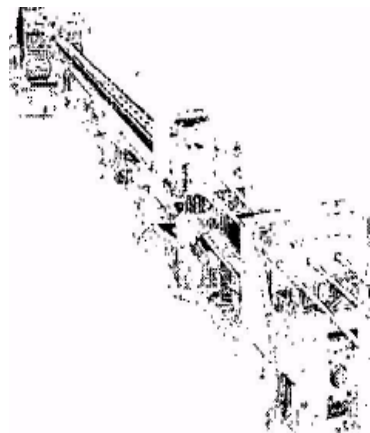


Рис. 6.3. Общий вид цепного многопрутковового волочильного стана

Однократные используют для волочения прутков, фасонных профилей и труб. Ось барабана - вертикальная или горизонтальная. Барабан является и тянущим, и намоточным устройством. Во избежание искажения формы профиля при намотке диаметр барабана должен в 30...40 раз превышать диаметр сматываемого изделия (до 3 м). Сила волочения до 100кН, скорость волочения — до 4,5 м/сек.

Принцип работы станов многократного волочения (рис. 6.4) заключается в одновременном протягивании заготовки через несколько последовательно расположенных волок. При выходе из одной волоки конец металла наматывается на барабан, а затем сматывается с него и через систему направляющих роликов поступает в следующую волоку и т.д. Применяют главным образом для волочения проволоки. Кратность волочения определяют по числу волок (6...9 и более). Скорость волочения до 20 м/сек.

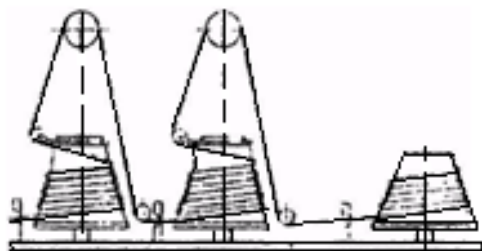


Рис. 6.4. Схема барабанного волочильного стана

6.2. Основные технологические операции при волочении.

Поступающая на волочение заготовка может иметь разную структуру и механические свойства по длине, что негативно сказывается на условиях волочения. Поэтому подготовка металла к волочению начинается с термической обработки.

1. Термическая обработка заготовки предназначена для гомогенизации структуры и повышения пластических свойств. В зависимости от материала применяют отжиг, нормализацию, закалку с отпуском и патентирование.

Наиболее широко применяют патентирование при подготовке катанки из углеродистых сталей. Обеспечивает получение мелкозернистой сорбитной структуры металла. Состоит в нагреве заготовки до температуры аустенизации и охлаждении в свинцовой (соляной) ванне при температуре 450...500°С. Процесс осуществляется в непрерывном режиме.

2. Удаление окалины с поверхности заготовки осуществляют химическим или механическим путем. Травление производят в непрерывных травильных агрегатах в растворах серной или соляной кислот. При механическом способе окалину чаще удаляют путем многократного изгиба в двух плоскостях с последующей обработкой металлическими щетками.

3. После травления поверхность заготовки тщательно промывают в горячей и холодной воде под давлением 1 МПа.

4. Нанесение подсмазочного слоя. Для лучшего удержания смазки на поверхность заготовки наносят тонкий слой различных материалов: гидрата окиси железа (операция желтения), меди (меднение), извести (известкование), фосфатов Ре, Мп и др. (фосфатирование).

5. Сушка бунтов в камерах при температуре 300-750°.

6. Волочение. Обжатие за проход - 10...30%, суммарное - 75...85% для стали и до 95% для цветных металлов.

Если при достижении предельного обжатия не получен заданный размер проволоки, проводят повторное волочение с выполнением всех подготовительных операций.

7. Отделочные операции: термическая обработка, правка, шлифовка, полировка, нанесение защитных покрытий (цинкование, лужение, алитирование, эмалирование, лакировка и пр.) в зависимости от назначения изделий.

Глава 7. Производство труб

По способу производства трубы подразделяют на бесшовные (катаные и прессованные) и шовные (сварные).

7.1. Бесшовные трубы.

Технологический процесс производства горячекатаных бесшовных труб состоит из следующих основных операций:

- получение полой гильзы из заготовки сплошного сечения (операция прошивки);
- раскатка гильзы в трубу;
- отделка труб.

В соответствии с этим трубопрокатный комплекс включает станы: прошивные, раскатные и отделочные.

Для прошивки заготовки используют станы поперечно-винтовой прокатки, преимущественно с бочкообразными валками (см. рис. 1.3). Нагрев заготовки в методических или кольцевых печах с вращающимся подом. Вытяжка при прошивке составляет 2...3,5.

Раскатку гильзы в трубу осуществляют на автоматических, непрерывных, пилигримовых или др. станах.

Наиболее распространены автоматические станы. Катают трубы диаметром 30...426 мм с толщиной стенки 3...30 мм в клетки дуо с диаметром валков до 1000 мм, в которых нарезаны калибры разных диаметров. При прокатке используют короткую оправку, которую предварительно на штанге вводят в зев валков. Прокатку осуществляют в 2...3 прохода с поворотом трубы на 90° вокруг своей оси и с заменой оправки перед каждым проходом.

В качестве смазки в полость трубы подают поваренную соль в смеси с графитом. Вытяжка за проход 1,4...1,6. Производительность стана до 300 тыс. т в год.

На непрерывных станах катают трубы диаметром 30... 114 мм с толщиной стенки 8... 12 мм на длинной подвижной оправке в группе из 7...9 последовательно расположенных клеток с индивидуальным приводом. Оси валков расположены под углом 45° к горизонту и под углом 90° по отношению друг к другу. Диаметр валков 530...550 мм с короткой бочкой - до 230 мм.

Суммарная вытяжка при раскате 5...7,5, скорость прокатки до

6 м/сек. , производительность - 300...500 тыс. т в год.

Окончательно трубу оформляют в отделочных агрегатах - обкатных, калибровочных, редуционных и пр.

Обкатные станы применяют для отделки (устранение овальности, разнотолщинности и пр.) труб большого диаметра. Их конструкция аналогична прошивным станам с бочкообразными валками.

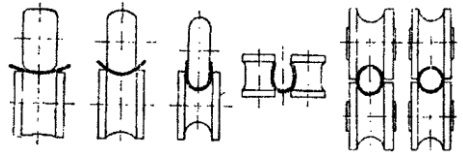
Калибровочные и редуционные станы по конструкции аналогичны непрерывным раскатным станам. Предназначены, соответственно, для повышения точности труб и уменьшения их диаметра.

На заключительных операциях трубы в зависимости от назначения термически обрабатывают, правят, режут на мерные длины, на концах нарезают резьбу, на поверхность наносят защитные и/или декоративные покрытия и пр.

Тип трубопрокатного комплекса определяют по типу раскатного стана, независимо от типов прошивных и отделочных станов.

7.2. Сварные трубы производят преимущественно методом печной сварки и электросварки.

Стан печной сварки по конструкции подобен профилегбочному стану, только непосредственно перед рабочими клетями установлена



проходная нагревательная печь, и профилирование полосы в трубу осуществляется в горячем

Рис. 7.1. Стан валковой формовки труб

состоянии. Кромки сформованной трубы обдувают сжатым воздухом и сжимают до получения сварного соединения. После стана трубу режут на мерные длины и направляют на отделку - калибровку, редуцирование, нанесение покрытий и пр.

Электросварные трубы производят главным образом методом электродуговой сварки под слоем флюса. По форме шва трубы подразделяют на прямошовные (с одним или двумя швами) и спиральношовные.

Процесс производства труб включает формовку заготовки в трубу, сварку кромок, отделку труб. Для формовки заготовок

используют прессы, непрерывные валковые станы для прямошовных труб (рис. 7.1) и спиральноформовочные машины для спиральношовных труб.

Прямошовные трубы производят поштучно из листовой заготовки заданных размеров.

Спиральношовные трубы более технологичны в изготовлении, чем прямошовные. Их формовка осуществляется из рулонной полосы непрерывно. Трубы разных диаметров можно получать из полосы одной ширины и, наоборот, трубы одного диаметра можно формовать из полос разной ширины. После сварки трубу разрезают газовым резаком на части мерной длины.

После сварки трубы поступают на отделку - термообработку, калибровку концов, правку, нанесение декоративных и/или защитных покрытий и др. Заключительная операция - гидравлические испытания.

Глава 8. Прессование металла

Прессование - один из распространенных методов ОМД. Осуществляют в горячем и в холодном состояниях, не только пластичных, но и хрупких материалов, не только компактных, но и порошкообразных (см. рис. 1.5).

Методом прессования получают изделия самой разнообразной формы, определяемой формой очка матрицы (рис. 8.1).

Достоинствами способа является большие вытяжки за прессовку (до 1000), возможность прессования малопластичных материалов, универсальность способа - можно получать разнообразные изделия простой заменой матрицы, высокое качество поверхности и точность прессуемых изделий.

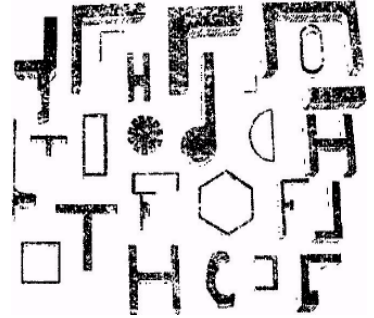


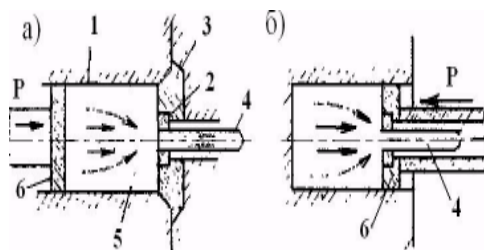
Рис. 8.1. Виды изделий, получаемых прессованием

К недостаткам следует отнести повышенный расход металла из-за прессостатка, сравнительно высокую стоимость прессового оборудования, низкую производительность.

Известны два метода прессования - прямой и обратный (рис. 8.2). При прямом направлении движения пуансона и изделия совпадают, при обратном - противоположны. Но главным отличием является наличие или отсутствие перемещения металла относительно стенок контейнера. При прямом прессовании металл скользит по поверхности контейнера (за исключением небольших участков в углах, образованных контейнером и матрицейдержателем - т.н. «мертвые зоны»), преодолевая противодействие сил контактного трения.

При обратном - такое скольжение металла отсутствует, поэтому сила обратного прессования в 1,5...2,0 раза меньше, чем при прямом. Но этот метод более сложен по использованию, длина изделия ограничена длиной штанги пуансона, ниже производительность. Поэтому он не получил широкого распространения.

Рис. 8. 2. Методы прессования металлов: а) прямой; б) обратный: 1 - контейнер; 2 - матрица; 3 - матрицедержатель; 4 - изделие; 5 - слиток; 6 — пуансон



Процесс прессования осуществляют в гидравлических и механических прессах. Более распространены гидравлические прессы.

Они отличаются простотой конструкции, обеспечивают значительные силы прессования, легкую регулировку скорости хода пуансона.

Гидравлические прессы бывают вертикального и горизонтального типов усилием до 60 МПа и более. Прессы укомплектовывают соответствующим вспомогательным оборудованием для подачи и выдачи слитков из печи, транспортировки слитка от печи к прессу и установки его в контейнер, отрезки пресс-остатка и его уборки и пр. Все эти операции от посадки слитка в печь до уборки готовых изделий полностью механизированы и автоматизированы.

Прессование полых изделий, в т.ч. труб, осуществляют из пустотелых гильз или сплошных заготовок на оправке (игле). При использовании сплошных заготовок ее вначале прошивают иглой в контейнере, а затем начинают процесс прессования - металл выдавливают в щель между матрицей и иглой. Эффективность прессования во многом зависит от прессового инструмента.

В процессе прессования он подвергается циклическому воздействию высоких температур (до 1250°C) с частыми теплосменами, высоким давлениям, абразивному трению. Особенно это относится к матрицам. По количеству отверстий матрицы бывают одно - и многоочковые (до 30).

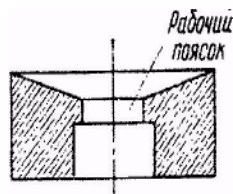


Рис. 8.3. Сечение типовой матрицы

Существенной частью матрицы является рабочий пояс, определяющий размер и форму прессуемых изделий (рис. 8.3). Длина рабочего пояса 4...5 мм для мелких профилей и 10... 15 мм - для крупных.

Из-за быстрого износа и потери размеров применяют матрицы со вставками из твердосплавных материалов.

Прессованные изделия обычно подвергают отделочным операциям - термообработке, травлению поверхности, правке, зачистке дефектов, нанесению защитных и/или декоративных покрытий и пр.

Глава 9. Ковочно-штамповочное производство

Пластическая деформация металлов преимущественно в горячем состоянии прерывном воздействии инструмента с целью придания металлу заданной формы и размеров называется ковкой или свободной ковкой (см. рис. 1.6). Если при этом используют специальный инструмент (штамп) - процесс называется штамповкой (см. рис. 1.7).

Эти способы в основном используют для производства заготовок, предназначенных для последующей чистовой обработки давлением или резанием. Сортамент и разнообразие получаемых изделий настолько широки, что они трудно поддаются учету. Практически каждый металлургический и машиностроительный заводы имеют в своем составе ковочно-штамповочное производство со своей номенклатурой изделий.

При использовании катанных заготовок для изготовления деталей путем механообработки потери металла в стружку составляют до 30...40%, а при использовании ковано-штампованных заготовок в 4...5 раз меньше. При этом и качество деталей существенно выше.

В качестве исходного материала дляковки используют обжатые заготовки и слитки массой от нескольких килограмм до 450 т, а для горячей штамповки - катанные, прессованные, кованые или волоченные заготовки.

Процессковки-штамповки включает следующие технологические операции.

1. Подготовительные: порезка заготовок на мерные длины, правка, удаление дефектов, нагрев в индукционных или пламенных печах и пр.

2. Собственно ковочно-штамповочные операции, связанные с изменением формы и размеров поковки.

3. Отделочные: обрезка **облоя**, термическая обработка и пр.

В отличие от прокатки при ковке степень деформации определяют величиной **укова**, представляющей собой степень изменения площади поперечного сечения или высоты заготовки. Для получения удовлетворительных механических свойств изделия из литой заготовки уков должен быть не менее 2,0.

Основными технологическими операциями при свободной **ковке** являются **осадка** (уменьшение высоты заготовки), **протяжка** (увеличение длины заготовки), **разгонка** (увеличение ширины заготовки), **прошивка** (получение сквозного или глухонного отверстия), **кузнечная сварка** (соединение нескольких поковок в одну) и др.

Свободную ковку выполняют на **молотах** и **прессах**. Молот состоит из шабота с нижним бойком, станины, подающих частей (бабы) с верхним бойком, привода и механизма управления.

Молоты характеризуют массой подающих частей. Различают молоты простого действия (деформация осуществляется только под действием массы свободно падающих частей) и молоты двойного действия (с применением принудительного ускорения падающих частей). В обоих случаях к моменту удара падающие части накапливают кинетическую энергию $E = mV^2/2$, где m – масса падающих частей, кг; V – линейная скорость падающих частей в момент удара, м/сек.

Полезно используемая энергия удара зависит от соотношения масс шабота и подающих частей. Для достижения КПД удара на уровне 0,8...0,9, масса шабота должна быть в 15 и более раз больше массы падающих частей.

Ковку слитков массой 2т и более обычно производят на гидравлических прессах с усилием прессования до 150 МН и выше.

Штамповка

Штамповку выполняют с использованием штампов, состоящих из двух и более частей. Полости штампа называются ручьями. Заготовку помещают в ручей нижнего штампа. При смыкании частей штампа **заготовка** деформируется, заполняя полости штампа и принимая соответствующую форму.

Штампы работают в тяжелых условиях, поэтому для их изготовления используют высокоизносостойкие и теплостойкие стали. Изготовление штампов – дорогостоящая операция. Поэтому штамповку целесообразно применять при массовом производстве изделий ограниченной номенклатуры.

Штамповка в закрытых штампах обеспечивает высокую точность изделий и механические свойства. Обычно механообработке подвергают только места сопряжения с другими деталями. При этом изделия могут иметь весьма сложную форму. В качестве заготовки при штамповке можно применять периодический прокат, что способствует существенному расширению сортамента изделий сложной формы. Процесс штамповки можно выполнять в одном или в нескольких штампах в зависимости от сложности изделия с окончательной обработкой в чистовом ручье.

Выполняют штамповку на молотах, прессах или горизонтально - ковочных машинах усилием до 750 МН.

Рекомендуемая литература

Основная:

1. Суворов И. К. Обработка металлов давлением. 3-е изд./М.: Высшая школа.1980.-368с.

Дополнительная:

1. Технология процессов обработки металлов давлением./Полухин П. И. и др.// М.:Металлургия. 1988.408с.

2. Обработка металлов давлением./Шевакин Ф. Ф. и др.//М.:Интернет Инжиниринг.2005.496с

3. Долженков Ф.Э. Обробка металів тиском (навчальний посібник).- Донецьк: ДонНТУ, 2005. – 78 с.