

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)



Ю.М. ЛУЖНОВ, В.Д. АЛЕКСАНДРОВ

# **ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ**

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(МАДИ)

Ю.М. ЛУЖНОВ, В.Д. АЛЕКСАНДРОВ

# **ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Под редакцией акад. МИА, проф. Ю.М. ЛУЖНОВА

МОСКВА  
МАДИ  
2013

УДК 620.179.112  
ББК 34.41  
Л 863

**Лужнов, Ю.М.**

Л 863 Основы триботехники: учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.В. Чичинадзе,  
канд. техн. наук, проф. Б.А. Кудряшов

Учебное пособие предназначено для студентов механических специальностей и слушателей курсов повышения квалификации, изучающих курс «Триботехника». В нем излагаются основные представления о природе фрикционного взаимодействия и износа трущихся тел, основах смазочного действия. Делаются акценты на поиски внутренней связи между твердыми телами, жидкостью (смазочной средой) и окружающей атмосферой. Формулируются условия для безаварийной работы узлов трения. Рассматриваются существующие методы испытания фрикционных материалов и технологические методы, направленные на повышение износостойкости и эффективности использования узлов трения.

УДК 620.179.112  
ББК 34.41

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в окружающем нас мире немыслим без развития машин и оборудования. Из года в год увеличивается их общее количество и удельная мощность. Наблюдается явная тенденция ужесточения режимов их эксплуатации, рост количества расходуемого топлива, смазочного материала и запасных частей, резкого увеличения объема ремонтных работ. По данным ООН, более трети вырабатываемой в мире энергии идет на преодоление сил трения, а четверть вырабатываемого металла расходуется только на восстановление потерь, связанных с износом деталей и узлов в машинах. В условиях наблюдающегося в мире истощения топливных и материальных запасов, а также значительного возрастания требований к надежности и долговечности машин остро встает вопрос о поиске мероприятий, способствующих решению этой актуальной проблемы. И среди них может оказаться более эффективное использование достижений в области трения, изнашивания и смазочных материалов, объединенных в понятии трибологии - производного от слова «Трибо», что в переводе с греческого означает трение.

В 80...90 % случаев машины выходят из строя по причинам повреждения узлов трения. Во многом это бывает связано как непосредственно с трением, так и с его воздействием. По экспертным оценкам ведущих в мире специалистов по трибологии, только применение уже достигнутых результатов в этой области может уменьшить повреждаемость машин на 25...30 %. Причем первые 10...15 % из них - практически без всяких капиталовложений, а только за счет более грамотного обслуживания машин и применения уже известных смазочных веществ - материалов и технологий.

По характеру своего проявления и действию трение и изнашивание твердых тел представляют собой, на первый взгляд, чисто механическое явление. Величину трения и износа легко измерить и оценить. Однако в основе формирования сил трения и изнашивания лежат сложные механические, физические и химические процессы. И с этим связано то, что далеко не всегда усматривается прямая зависимость между трением и износом, реализуемыми в узлах трения машин.

Большой вклад в развитие учения о трении, износе и смазках сделали И.В. Крагельский, Б.В. Дерягин, П.А. Ребиндер, М.М. Хрущев,

Ф.П. Боуден, Н.Б. Демкин, Н.А. Буше, Н.М. Михин, А.В. Чичинадзе, А.С. Ахматов и др. Особое внимание при этом заслуживают труды крупных трибологов (представленные в виде учебников, методических разработок и справочников), направленные на обучение инженерно-технических работников. Это, прежде всего, работы И.В. Крагельского с соавторами, Н.Б. Демкина, Н.А. Буше, А.В. Чичинадзе, Д.Н. Гаркунова, Б.И. Костецкого, Э.Д. Брауна с соавторами и др., многие из которых уже сейчас стали, к сожалению, библиографической редкостью.

Настоящее пособие предназначено для студентов механических специальностей и слушателей курсов повышения квалификации, изучающих курс «Триботехника». В нем излагаются основные представления о природе фрикционного взаимодействия и износа трущихся тел, об основах смазочного действия. Делаются акценты на поиски внутренней связи между твердыми телами, жидкостью (смазочной средой) и окружающей атмосферой. Формулируются условия для безаварийной работы узлов трения. Рассматриваются существующие методы испытания фрикционных материалов и технологические методы, направленные на повышение износостойкости и эффективности использования узлов трения.

## **Глава 1. ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОТЕХНИКА**

### **1.1. Основные понятия**

Окружающий нас материальный мир находится в непрерывном движении. Движение осуществляется как на микро- так и на макроуровнях. В движении находятся атомы, ионы и молекулы, а также тела, детали узлов трения машин, сами машины и планеты. Если на микроуровнях характер движения частиц определяется, в конечном счете, температурой тела, то на макроуровне - уже работой, эквивалентной силе, затрачиваемой на единицу пути перемещающихся тел.

Сопrotивление относительному движению тел принято характеризовать понятием трения. Трение всегда связано с поглощением внешней, чаще всего механической работы и рассеиванием реализуемой во фрикционной паре энергией, преимущественно в виде тепла.

Развитие учения о трении начиналось с периода деятельности первобытного человека и продолжается по настоящий день.

Трение в деятельности человека играет как положительную, так и отрицательную роль. Известно, что внезапное уменьшение трения,

происходящее между колесами автомобиля или локомотива с дорожным покрытием или рельсами, делает совершенно беспомощной эту мощную транспортную технику для совершения ею поступательного движения вперед и создает крайне опасную ситуацию при необходимости торможения транспортных средств. Без устойчивого трения становится также невозможной работа многих механических передач, тормозов и муфт. Помимо достижения решения ряда технических задач преодоление сил трения всегда связано с большим расходом энергии. Известно, что у хорошо отлаженного современного реактивного авиационного двигателя на это расходуется до 2% его мощности, у автомобильного двигателя – 26...44 %, у локомотивов - более 50%, а у текстильных машин - более 80% от затрачиваемой ими мощности. В условиях реальной эксплуатации машин отмеченные выше потери энергии от трения, как правило, возрастают.

Реализуемые в зоне трения силы и генерируемая там энергия, в свою очередь, воздействуют на материал трущихся тел и приводят к его изнашиванию. Этот процесс, незаметный иногда для наблюдателя, приводит узлы трения машин к состоянию, когда дальнейшая эксплуатация их становится нерациональной или даже опасной.

Процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и остаточной деформации тела, получил название *изнашивание*, а сам результат изнашивания - *износ*. В соответствии с характером нарушения фрикционных связей между телами различают процессы микрорезания, молекулярного схватывания, пластического и упругого разрушения контактов. В реальных машинах обычно реализуются одновременно все эти виды разрушения тел, хотя в отдельных случаях отдельные из них могут оказаться и преобладающими.

Трение и износ материалов весьма чувствительны к влиянию внешней среды. В зависимости от качества и количества инородных тел, попадающих в зону трения, силы трения между контактирующими телами могут меняться в десятки и сотни раз. И это явление широко используется для управления трением и износом в машинах с помощью специально подобранных смазочных материалов.

В общем случае *смазочным материалом* называется материал, подаваемый на поверхность трения для уменьшения скорости изнашивания и силы трения. Природа и свойства смазочного материала

могут быть весьма разнообразны. Наибольший эффект от применения смазочных материалов наблюдается в условиях, когда их выбор осуществляется с учетом действительных свойств материала контактирующих тел, конструкцией узла трения и условиями его нагружения.

Наука о трении и процессах, сопровождающих трение, получила название *трибология* (от греч. «трибос» - трение и «логос» – наука). Она охватывает экспериментальные и теоретические исследования физических, механических, химических и других явлений, связанных с трением, и базируется на материалах ряда специальных дисциплин. Самостоятельными ее разделами стали *трибофизика*, *трибохимия*, *трибобиология*, *фрикционное материаловедение*, *тепловая динамика трения* и *химотология* - раздел науки о свойствах, качестве и рациональном использовании топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей во фрикционных парах.

Наука о практическом использовании трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации трибологических систем получила название *триботехника*.

В настоящее время еще нет законченной, точной и полной теории, описывающей все случаи фрикционного взаимодействия трущихся тел. Современное развитие науки вооружает нас подходами к решению ряда частных задач, имеющих уже сейчас большое практическое значение. Триботехника открывает возможности для принятия обоснованных и грамотных решений по уменьшению энергетических потерь и увеличению срока службы машин и оборудования, а также позволяет более эффективно решать вопросы снижения объемов неблагоприятных воздействий машин и оборудования на экологию окружающего нас мира.

## **1.2. Роль трения в работе машин и оборудования и основные задачи триботехники**

Уровень фрикционного взаимодействия в узлах трения машин и оборудования во многом определяет их эффективность в работе, а также материальные и энергетические потери. Например, на железнодорожном транспорте в прямой зависимости от величины коэффициента сцепления колес с рельсами находятся такие важные показатели его работы, как скорость движения и масса поездов. Увеличение коэффициента сцепления колес с рельсами всего на 0,01 может дать го-

довой экономический эффект 10 млн. руб., а уменьшение потерь от сопротивления движению поездов на 1% - экономию 15 млн. руб. в год.

Опыт свидетельствует, что в 80...90 % случаев машины выходят из строя по причинам неудовлетворительной работы узлов трения (износа, задира, связанных с этим поломками и т.п.). Затраты на ремонт и обслуживание машин в несколько раз превышают их первоначальную стоимость: для автомобилей - в 6 раз, самолетов - в 5 раз, станков - до 8 раз. На долю заводов, выпускающих новые тракторы в нашей стране, приходится 22% мощностей, на долю же заводов, изготавливающих запасные части к тракторам - 30%, а на долю ремонтных предприятий - 44%. Это означает, что на ремонт тракторов затрачивается почти в 4 раза больше производственных мощностей, чем на их изготовление. В сумме на запасные части расходуется более одной пятой выплаваемого в стране металла. Трудоемкость ремонта и технического обслуживания многих строительных машин за срок их службы в 15 раз превышает трудоемкость изготовления новых.

За весь срок службы двигатели автомобилей, тракторов и комбайнов ремонтируют до 5 раз. Ресурс двигателя после ремонта составляет 30...50 % от нового. Общий объем отремонтированных двигателей почти в 2 раза превышает объем новых. Отремонтированные двигатели расходуют больше топлива и смазочных материалов на 10% и более.

Положение дел усугубляется еще и тем, что выпускаемые в нашей стране моторные масла, служащие для уменьшения потерь энергии, износа и повреждаемости машин, не всегда соответствуют международному уровню. Объем выпуска масел высшего качества для автотракторных дизелей составляет лишь 6%. Крайне мал выпуск моторных масел с улучшенными низкотемпературными свойствами. Выпуск легированных индустриальных масел не превышает 6% от общего объема. Производство многоцелевых литиевых смазок не достигает и 10%. Применяемые же в РФ смазочные материалы, как правило, низкого качества, а также недостаточное развитие триботехнического материаловедения привели к тому, что в РФ расход моторных масел по отношению к расходу топлива в 2...3 раза превышает этот показатель по США. Все это приводит к тому, что при приблизительно

равном потребляемом в стране объеме моторных масел в США обслуживается парк автомобилей, в 8 раз больший, чем в РФ.

Принято считать, что в РФ в сложившихся условиях потери от трения и связанных с этим явлений составляют порядка 40 млрд. руб. при имеющейся тенденции ежегодного увеличения их приблизительно на 1 млрд. руб. В США те же самые потери составляют порядка 46 млрд. долларов, причем половина из них приходится на автомобили. Аналогичные явления наблюдаются и в других странах, и в большинстве случаев потери составляют 1,5...4 % их национального дохода. Это свидетельствует о том, что проблема трения, износа и смазки машин и оборудования, помимо чисто технической, является и экономической проблемой государственного масштаба. Экспертный анализ специалистов свидетельствует, что столь большие потери от трения происходят из-за разрыва между триботехникой и развитием промышленности и транспорта. Большое значение при этом отводится и отсутствию достаточной подготовки специалистов в этой области. Уже сейчас только за счет использования имеющихся достижений триботехники потери от трения можно уменьшить на 30...40 %, причем первые 10% из них - без дополнительных материальных вложений. При этом, как показывают исследования, проведенные в Великобритании, основная масса экономии средств от внедрения достижений триботехники достигается за счет сокращения затрат на обслуживание и ремонт машин, исключения потери из-за поломки оборудования и экономии капиталовложений за счет повышения долговечности машин (табл. 1.1).

Помимо явно выраженных технических и экономических аспектов, решаемых триботехникой, не менее важным является направление ее работ по улучшению экологии. Это, прежде всего, относится к переработке отработанных в машинах смазочных материалов. При производстве в мире смазочных материалов в 100 млн. т проблема их утилизации достаточно сложна. Актуальной стала и проблема поиска путей ускорения процесса разложения смазки, выпадаемой на землю, в ходе работы транспортных средств, а также и обратная проблема по восстановлению работоспособности смазки в климатических условиях с активным воздействием бактерий. В этой области открываются большие перспективы для использования триботехнических технологий. Острой также стала проблема замены на транспорте и в про-

мышленности широко распространенных, но вредных для организма человека материалов. Этим и другими аналогичными вопросами активно занимаются сейчас трибологи ряда некоторых стран.

Таблица 1.1

Оценка экономии, реализуемой промышленностью Великобритании при последовательном внедрении достижений триботехники в практику

№ п./п.	Показатель	Экономия (млн. фунтов стерлингов/год)
1	Снижение потребления энергии за счет меньшего трения	28
2	Сокращение ручного труда	10
3	Снижение затрат на смазку	10
4	Снижение затрат на обслуживание и ремонт	230
5	Исключение потерь за счет поломки оборудования	115
6	Экономия вложений вследствие более интенсивного использования оборудования и большего КПД	22
7	Экономия вложений вследствие более интенсивного использования оборудования и большего КПД	100
Всего		515

В соответствии с вышесказанным можно выделить основные задачи триботехники на современном этапе.

1. Углубление научных представлений о природе фрикционного взаимодействия и закономерностях трения и изнашивания наиболее ответственных узлов трения машин и оборудования и определение направлений по более эффективному совершенствованию узлов трения, лимитирующих работу машин.
2. Разработка прогрессивных фрикционных и антифрикционных материалов (несущих поверхностей твердых тел, смазок и т.п.).
3. Разработка технологий, регулирующих свойства поверхностей трения.
4. Оптимизация конструктивных решений узлов трения.

5. Эксплуатационные мероприятия по повышению долговечности машин.

6. Повышение квалификации инженеров в области трения, износа и смазки и совершенствование контрольно-измерительных и расчетных триботехнических методов.

7. Организация комплексного подхода к решению проблемы повышения экономичности, долговечности и обеспечения узлов трения экологически чистой их работы.

В условиях, когда для жизнеобеспечения человечества требуются более производительные и менее энергоемкие машины и когда в мире приходится сталкиваться с дефицитом топливно-энергетических и материальных ресурсов, достижения и возможности трибологии и триботехники приобретают особое значение для решения стоящих перед обществом задач по повышению экологической чистоты, эффективности и безопасности использования машин и оборудования.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Что такое трение?
2. Что такое износ?
3. Что такое смазка?
4. Что изучает трибология?
5. Чем трибология отличается от триботехники?
6. Почему и по каким признакам выходят из строя машины?
7. Определите место науки о трении, износе и смазочных материалах в нашей стране. Каковы потери от трения и изнашивания?
8. Каковы пути повышения качества и надежности работы машин и механизмов?

## **Глава 2. ВИДЫ И РЕЖИМЫ ТРЕНИЯ**

Соппротивление относительному движению контактирующих тел под действием внешних сил получило название *трение*. Сила трения направлена тангенциально к общей границе взаимодействующих тел и всегда препятствует их движению.

### **2.1. Классификация трения**

Трение по характеру проявления и действия обычно представляется механическим явлением. Однако в его основе лежат сложные

молекулярно-механические взаимодействия, во многом зависящие от состава, строения, объемных и поверхностных свойств трущихся тел. Большое многообразие сил трения, встречающихся в природе, принято классифицировать по видам и режимам его проявления (рис. 2.1). В основе этой классификации лежат резкие отличия закономерностей трения для различных случаев.

По кинематическим признакам трение (рис. 2.2) подразделяют на следующие три вида.

1. *Трение острия.* Случай, когда вращение одного из двух контактирующих тел происходит вокруг оси, представляющей собой нормаль, проведенную через единственную точку соприкосновения со вторым телом.

2. *Трение качения.* Оно представляет собой случай, когда перемещение одного тела (шара, цилиндра) по другому (плоскости) происходит вокруг оси, не пересекающей ни одно из трущихся тел, и скорость относительного смещения которых в точке контакта равна нулю.

3. *Трение скольжения.* Случай трения, когда скорость относительного скольжения тел отлична от нуля.

Различие первых двух видов состоит в том, что при качении точки (линии) контакта одного тела соприкасаются с точками (линиями) контакта другого тела на мгновение, в то время как при трении острия (верчения) они находятся в соприкосновении длительное время.

Вышеприведенная классификация трения по его видам является строгой только лишь в случае, если мы имеем дело с абсолютно упругими (твердыми) телами. При реализации же первого и второго видов трения реальных тел ввиду развивающихся очень высоких концентраций напряжений в контактной зоне происходит сжатие трущихся тел. Контакт между телами представляет собой уже не точку или линию, а некоторую площадь. Размеры этой площади определяются формой контактирующих тел, их механическими свойствами, а также величиной сжимающего усилия. Поэтому при трении реальных тел, помимо трения острия и качения, появляются участки контактной площади, на которых реализуется трение скольжения. На этом основании можно считать, что наиболее распространенным видом трения в окружающем нас мире является трение скольжения.

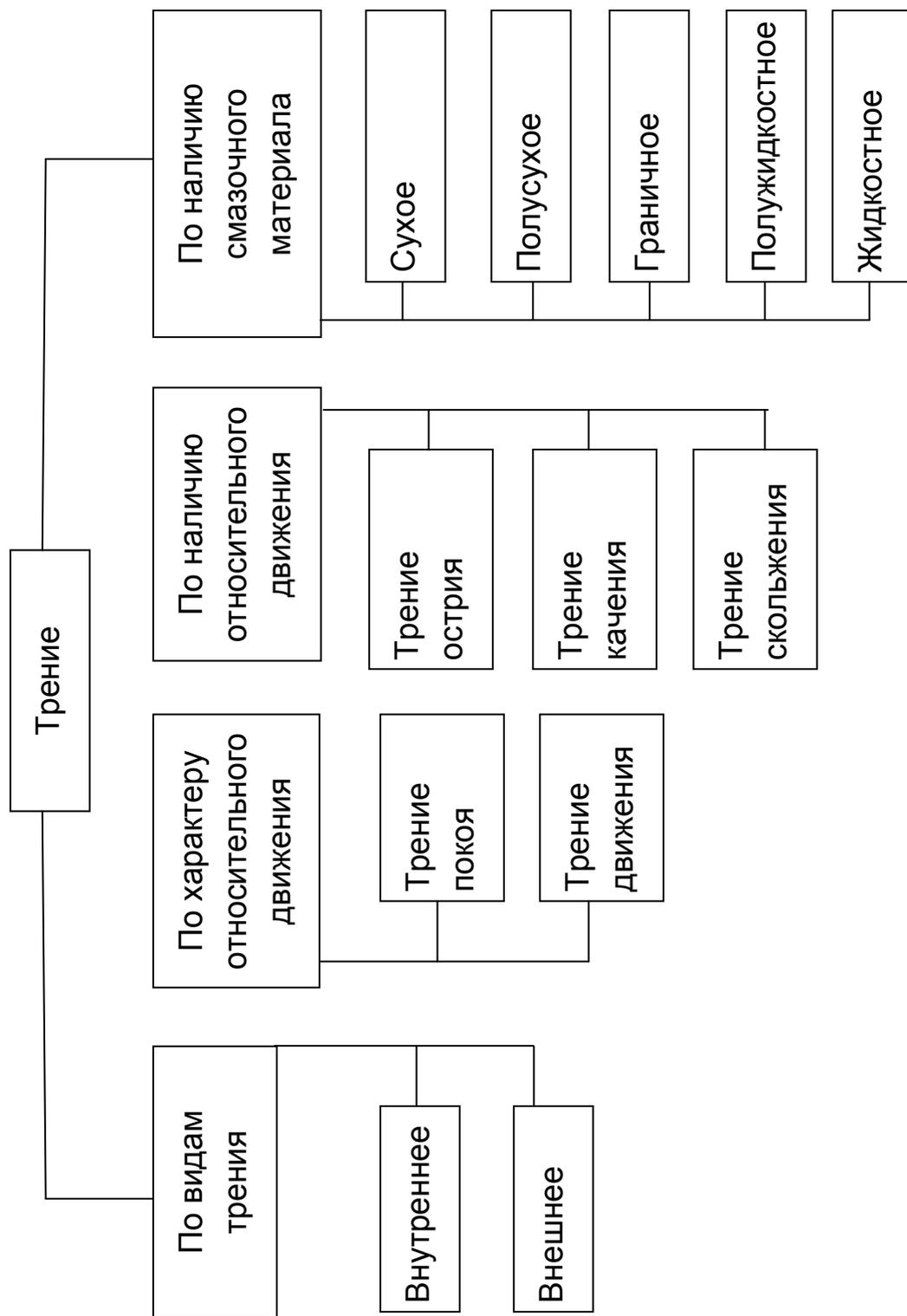


Рис. 2.1. Классификация трения по основным критериям

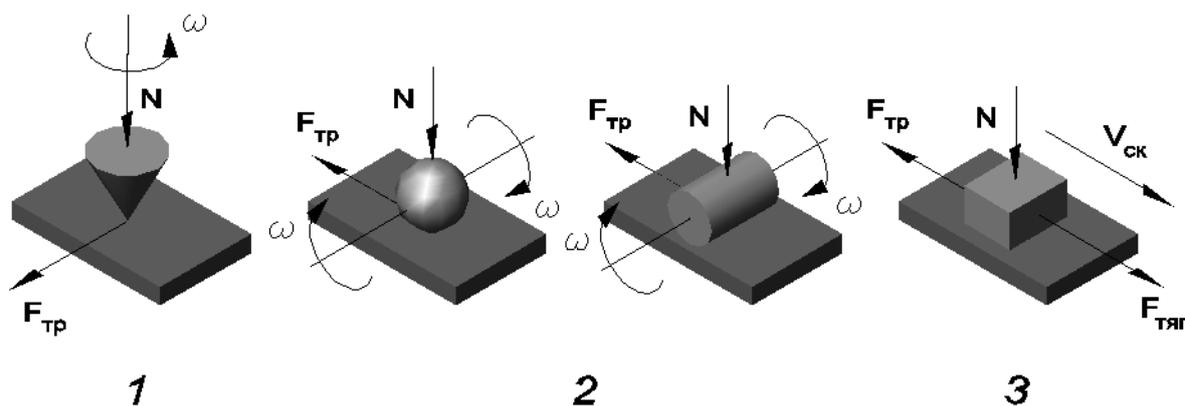


Рис. 2.2. Подразделение видов трения по кинематическим признакам: 1 – трение острия (верчения); 2 – трение качения; 3 – трение скольжения

Помимо перечисленных выше видов трения еще различают трение *статическое* и *кинематическое*. Статическое трение определяется минимальным усилием (при микросмещении контактирующих тел), необходимым для выведения одного из тел в состояние его относительного движения. Кинематическое же трение характеризуется усилием, приложенным к движущемуся телу для поддержания постоянной скорости его движения.

Для сопоставления и сравнения трения между телами часто используется понятие *коэффициента трения* ( $\mu$ ), под которым подразумевается отношение силы трения ( $F$ ) между телами к нагрузке (нормальной сжимающей их силе -  $N$ )

$$\mu = \frac{F}{N}.$$

Помимо кинематических признаков трение различают по режимам трения: внешнее и внутреннее.

При *внешнем трении* процессы, определяющие возникновение трения, развиваются в тонких поверхностных слоях трущихся тел. Ввиду шероховатости поверхности, присущей любому телу, площадь истинного контактирования между телами имеет дискретную структуру, а ее величина во многом зависит от сжимающего усилия, приложенного к трущимся телам (рис. 2.3).

Сила трения  $F$  в этом случае определяется суммированием силового взаимодействия на каждом из элементарных  $n$  контактов трущихся тел  $f_i$

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n \bar{f}_i.$$

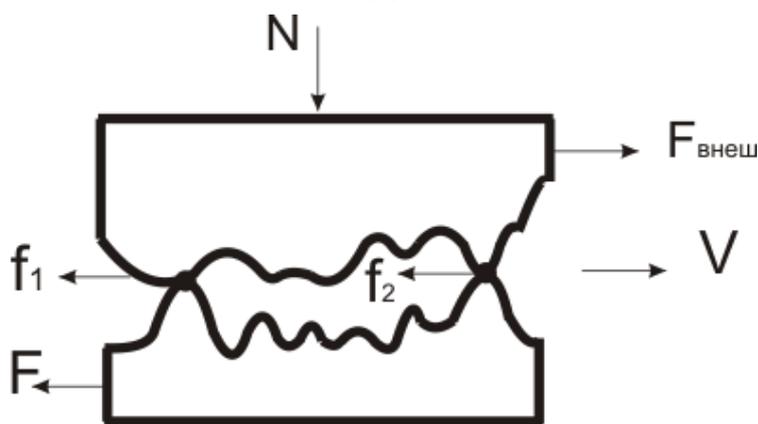


Рис. 2.3. Схема формирования силы трения

Характерным для внешнего трения является то, что все процессы, сопровождающие его (в том числе и выделение тепла при трении), происходят главным образом на поверхностях контактирующих тел.

В основе *внутреннего трения* лежат процессы, происходящие внутри одного из тел, имеющего легкую подвижность атомов или частиц, составляющих это тело. Примером таких тел могут быть жидкости, газы, твердые смазки, мягкие металлы и т.п. При внутреннем трении площадь, по которой происходит трение, непрерывна и определяется контурными размерами тел, а ее величина не зависит от усилия сжимающего тела. Деформационная зона охватывает весь объем трущегося тела, и выделяющаяся при трении энергия равномерно распределяется внутри этого тела. В отличие от внешнего трения, где частицы трущихся тел под влиянием выступов контртела совершают при трении колебательное движение относительно положения своего равновесия, при внутреннем трении происходит смещение частиц подвижного материала преимущественно в направлении плоскости касания (движения) тела.

Природа внутреннего трения едина. В его основе лежит передача импульса (количества движения) от одного слоя к другому. Природа же внешнего трения является более сложной. Она включает в себя молекулярные взаимодействия между телами, а также и деформационные процессы, наблюдающиеся при трении. В этом заключается принципиальное отличие внутреннего трения от внешнего.

В реальных механизмах и машинах, в которых используются специальные смазочные материалы и осуществляется контакт с окружающей средой, реализуются более сложные механизмы и режимы трения. Среди них наиболее распространенными стали следующие.

*Сухое трение (трение без смазки)* - трение при отсутствии смазывающих веществ на трущихся поверхностях. Отличается самым большим коэффициентом трения (обычно 0,2...0,5; иногда в атмосферных условиях достигает 0,8...0,9; а в вакууме и более нескольких единиц). Этот режим трения используется в тормозах, сухих муфтах, ременных и сухих фрикционных передачах, соединениях с натягом с обезжиренными поверхностями.

*Полусухое трение* - смешанное трение, при котором наряду с преобладающим сухим трением на отдельных участках площади контакта возникает граничное трение. Этот вид трения характерен для резьбовых соединений, поверхностей зажима изделий.

*Граничное трение* - трение при наличии тонких слоев смазки (0,1 мкм и менее), когда смазка обладает свойствами, отличными от объемных. Граничная пленка обладает высокой несущей способностью на сжатие, измеряемой сотнями МПа, и уменьшает износ в сотни раз. Коэффициент трения в этих условиях меньше, чем при сухом трении (обычно 0,05...0,1). Граничное трение преобладает в подшипниках с малыми скоростями, в большинстве направляющих, иногда проявляется в вариаторах и зубчатых передачах. Реализуется также в тормозах и муфтах, работающих со смазкой.

*Полужидкостное трение* - смешанное трение, сочетающее в себе жидкостное и граничное трение. Возникает в тихоходных опорах (подшипниках и направляющих), а также при пусках и остановках в опорах жидкостного трения. При полужидкостном трении нагрузка воспринимается частично гидродинамическими силами в масляных слоях, частично передается через граничную пленку. Непосредственный контакт поверхностей твердых тел может проявляться при пусках и остановках. Гидродинамическое давление возникает при движении в макрогеометрических сужающих зазорах между трущимися поверхностями, а также в микрогеометрических клиновых зазорах, образуемых микронеровностями.

*Жидкостное гидродинамическое трение* – вид трения, когда смазочная жидкость увлекается в суживающийся между трущимися поверхностями зазор и создает гидродинамическое давление, полностью уравновешивающее внешнюю нагрузку. Возникает в подшипниках и направляющих при значительных скоростях.

*Жидкостное гидростатическое трение* – вид трения, при котором масло, разделяющее трущиеся поверхности, подается под давлением от отдельного насоса. Используется при малых скоростях, недостаточных для обеспечения гидродинамического трения, для уменьшения момента трения и износа при пуске машин.

*Жидкостное контактно-гидродинамическое трение* - вид трения при качении или качении со скольжением. Возникает в роликовых подшипниках, зубчатых и червячных передачах и аналогичных деталях. Здесь контактные деформации принципиально меняют форму зазора, а высокие давления и температура в тонкой масляной пленке резко изменяют вязкость масла.

*Трение в условиях вязко-эластичной (консистентной) смазки* – трение, которое реализуется в узлах трения скольжения при периодической работе и трудности применения жидкой смазки. Широко применяется в узлах трения качения.

*Трение в условиях газовой (воздушной) смазки* - трение, которое реализуется в быстроходных подшипниках газовых турбин, шлифовальных станков, центрифуг, сепараторов. Характеризуется минимальным сопротивлением вращению, малым теплообразованием, нечувствительностью к изменению температуры.

*Трение в условиях вакуума, низких и высоких температур* получило распространение с развитием вакуумной и космической техники. Вследствие весьма напряженного теплового баланса на поверхностях трения - из-за отсутствия теплоотвода - здесь применяют твердые смазки, самосмазывающиеся материалы, пленочные металлические покрытия, а в нагруженных фрикционных устройствах - специальные теплостойкие материалы.

В зависимости от вида и реализуемого режима трения коэффициенты трения в узлах машин и оборудования могут существенно меняться. Наиболее характерные из них представлены в табл. 2.1.

Как при переходе от режима к режиму трения, так и внутри каждого из режимов коэффициенты трения могут меняться в десять раз. Столь значительные их изменения связаны и с изменением природы фрикционного взаимодействия, и со свойствами поверхности контактирующих тел, способных весьма значительно влиять на механизм трения и изнашивания трущихся поверхностей.

Значения коэффициентов трения

Вид трения	Режим трения	Коэффициент трения
Скольжения	Сухое	0,1...1
	Граничное	0,05...0,2
	Жидкостное	0,002...0,01
	Газодинамическое	0,0005...0,001
Качения	Сухое	0,01...0,005
	Со смазкой	0,005...0,0005

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Опишите основные критерии для определения видов трения.
2. Определите разновидности признаков трения.
3. Что такое коэффициент трения?
4. Что такое внешнее трение?
5. Что такое внутреннее трение?
6. Каковы разновидности режимов и видов трения?

### Глава 3. ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В основе механизма трения твердых тел, несмотря на кажущуюся его простоту, лежат трудно поддающиеся исследованию весьма сложные молекулярно-механические процессы. Для того чтобы охарактеризовать современное состояние учения о внешнем трении, следует коротко рассмотреть эволюцию взглядов на его природу и остановиться на существующих теориях трения, получивших наибольшее признание.

Первые положения о закономерностях внешнего трения были изложены еще в работе Леонардо да Винчи, опубликованной в 1508 г.

В 1751 г. Г. Амонтон подтвердил предположения Леонардо да Винчи и впервые сформулировал закон трения в следующем виде:

$$F = \mu \cdot N,$$

где  $F$  - сила трения;  $\mu$  - коэффициент пропорциональности (трения);  $N$  - нагрузка (нормальная сила).

Амонтон считал, что сопротивление относительному смещению трущихся поверхностей связано исключительно с находящимися на поверхностях трения выступами, механически цепляющимися один

за другой. По его мнению, коэффициент трения не зависит от нагрузки, формы и размеров трущихся поверхностей, а его величина определяется в основном природой и состоянием поверхности трущихся тел. Вследствие ограниченности знаний того времени относительно природы и строения поверхности трущихся тел ряд известных исследователей того времени Паран, Лейбниц, Орлов, Вышеградский, де Камюс, Эйлер, Делагер и другие в дальнейшем развивали взгляды на трение как на чисто механический процесс.

В начале XVIII века среди работ, направленных на выявление природы трения, стали появляться такие, в которых обнаруживались отклонения от закона Амонтона. Например, было установлено, что на более гладких поверхностях коэффициент трения выше, чем на более шероховатых. Это в корне противоречило механической теории трения того времени. В 1785 г. Кулон предложил учитывать наблюдаемые на практике отклонения от закона Амонтона путем введения в него второго дополнительного члена

$$F = \mu \cdot N + A.$$

В этом законе Кулон сформулировал действительную природу трения. Он указал, что трение представляет собой совокупность двух видов сцепления: зацепления, пропорционального нагрузке и не зависящего от площади (первое слагаемое в первой части закона трения), и сцепленности, связанной с площадью касания ( $A$ ). Кулон был далек от понимания сцепленности как молекулярного взаимодействия. По обычаю того времени все явления, наблюдающиеся в природе, сводились к механическим. Кулон объяснял сцепленность между телами наличием «ворса», состоящего из материала трущихся тел.

В середине XIX века в учении о трении появляется тенденция постепенного отказа от взгляда на трение как на чисто механическое явление и объяснения его на основе атомно-молекулярных представлений о строении твердых тел. В 1834 г. Дезаголье предложил при изучении трения тел принимать во внимание молекулярные силы. Однако эта мысль Дезаголье не была одобрена исследователями трения того времени и вскоре была забыта. Существенным толчком, повлиявшим на перемены в учении о трении, явилось развитие науки о молекулярном строении вещества и открытие закона сохранения энергии.

В 1901 г. французский физик Бриллюэн опубликовал работу «Молекулярная теория трения твердых тел с гладкой поверхностью». Брилл-

люэн полагал, что поверхность твердого тела состоит из молекул, поэтому силы притяжения распределяются на ней периодически, образуя большое количество максимумов и минимумов. Для каждой свободной, а также слабо закрепленной молекулы существует множество положений устойчивого и неустойчивого равновесия. Каждое достаточно тесное сближение молекул трущихся тел вследствие взаимного их перемещения приводит к увеличению кинетической энергии этих молекул, которая затем переходит в тепловую. Он также указал, что рассеяние энергии при трении происходит аналогично рассеянию энергии магнитной стрелки, движущейся в неоднородном магнитном поле центров притяжения.

Дальнейшее развитие теории Бриллюэна было возможным лишь при исследовании взаимодействия идеально гладких поверхностей. Трудности экспериментального плана в то время не позволяли провести такие исследования, и поэтому теория Бриллюэна не получила своего дальнейшего развития.

Среди исследований в области трения, относящихся к этому же периоду, следует особенно отметить работы Гарди, сформулировавшего важное для дальнейшего развития теории положение о том, что реализация тангенциального усилия между трущимися телами является осуществимой лишь благодаря наличию дискретной структуры молекулярных полей твердых тел. Важное значение при трении твердых тел Гарди придавал поверхностным пленкам, находящимся на трущихся телах. По его мнению, взаимное скольжение контактирующих тел, лишенных поверхностных пленок, явилось бы невозможным в силу неперемещения тел.

Терцаги, исследуя трение твердых тел, в 1925 г. установил, что при трении следует отличать кажущуюся (контурную) площадь контактирования от истинной (фактической) площади контакта. Истинная площадь контакта во много раз (по современным данным в 100...10000 раз) меньше кажущейся, и прямые ее измерения весьма затруднены. Площадь истинного контактирования между телами существенно возрастает по мере приложения к ним сжимающего усилия. По мнению Терцаги, причиной появления сопротивления относительно смещению твердых тел являются силы молекулярного притяжения в местах истинного контактирования трущихся поверхностей.

Первая попытка разработать теорию трения с учетом влияния сил молекулярного притяжения и отталкивания между атомами тру-

щихся тел была предпринята Томлинсоном в 1929 г. Автор этой работы рассматривал процесс трения как совокупность двух элементарных явлений различного рода:

1) процесса разрыва молекулярных связей, сопровождающегося необходимыми потерями энергии;

2) процесса возникновения новых связей с проявлением сил отталкивания, уравновешивающих собой действие внешних сил.

При этом предполагалось, что при трении происходит только упругое деформирование трущихся тел. Для коэффициента трения Томлинсоном получено следующее выражение:

$$\mu = \frac{q \cdot W}{R \cdot L} = \frac{q \cdot W \cdot n}{N \cdot L},$$

где  $W$  - работа разрыва одной молекулярной связи;  $L$  – расстояние между молекулами в кристаллической решетке;  $q$  - коэффициент, учитывающий хаотичность расположения молекул;  $R$  – элементарная сила отталкивания между молекулами.

$$R = \frac{N}{n},$$

где  $n$  - число молекулярных пар, воспринимающих давление  $N$ .

Применив закон Амонтона для пары молекул, Томлинсон получил выражение силы трения в следующем виде:

$$F = \mu \cdot N = \frac{q \cdot W \cdot S_H}{i} = C \cdot S_H,$$

где  $C$  - универсальная постоянная;  $S_H$  - номинальная площадь контакта, пропорциональная числу молекулярных пар, воспринимающих давление.

Используя закон Амонтона для пары молекул в разработке своей теории, Томлинсон тем самым оставил открытым вопрос об обосновании на базе своей теории закона Амонтона и имеющих место отклонениях от него. Ошибки, допущенные Томлинсоном в процессе разработки своей теории трения, привели к противоречию с законом Амонтона и не допустили её дальнейшего распространения.

Строгая теория трения с учетом законов молекулярного взаимодействия твердых тел была разработана Б.В. Дерягиным. В основу теоретической схемы им была выбрана наглядная модель двух наложенных один на другой идеальных и одинаково ориентированных монокристаллов, имеющих шероховатость, обусловленную сфе-

рическими силовыми полями атомов поверхности, рассматриваемых автором теории как упругие шары.

Под влиянием нагрузки  $N$  (веса кристалла) шары верхнего тела входят во впадины между шарами нижнего тела (например, достигая положения точки  $A$  на рис. 3.1). Шары занимают энергетически более выгодное положение с минимумом потенциальной энергии и сближаются между собой до расстояний, при которых проявляются силы отталкивания между электронными оболочками.

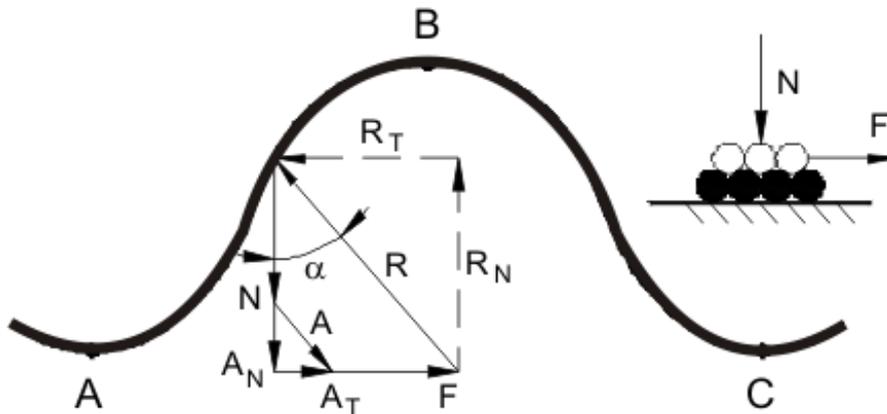


Рис. 3.1. Механизм трения по Б.В. Дерягину:  
*ABC - траектория движения атома;  $N$  - нагрузка;  $A$  - сила притяжения;  
 $F$  - внешняя сила;  $R$  - равнодействующая сил отталкивания*

В качестве элементарного процесса трения рассматривается взаимодействие упругих шаров (атомных электронных оболочек), одни из которых подвижные, а другие - нет. Под действием внешней силы верхние шары начинают двигаться из потенциальной «ямы» (точка  $A$ ) по поверхности нижних шаров, приобретая при этом потенциальную энергию. После преодоления некоторого потенциального барьера (точка  $B$ ) они скачком переходят в соседнюю потенциальную «яму» (точка  $C$ ), выделяя при этом тепловую энергию (как источник тепла, развивающийся при трении). По мнению Я.И. Френкеля, трение можно считать особым принципом мгновенного сброса избыточной кинетической энергии. В осуществлении этого процесса принимают участие только силы отталкивания между атомами.

Коэффициент трения при движении одного шара по другому определяется как отношение силы трения  $F$  к вертикальной нагрузке  $N$  и равняется тангенсу угла наклона в точке контактирования шаров, т.е.

$$\frac{F}{N} = \operatorname{tg}(\alpha) = \mu.$$

При переходе от элементарного процесса трения к трению монокристалла в целом следует принимать во внимание и силы молекулярного притяжения между телами. В этом случае следует учитывать, что силы притяжения имеют больший радиус действия, чем силы отталкивания. Они медленно убывают с изменением расстояния от поверхности трения. Имеют более пологие изопотенциальные поверхности и меньше реагируют на атомарные неровности соприкасающихся тел. Силы молекулярного притяжения имеют свою равнодействующую, направленную почти вертикально, и тем самым увеличивают нормальную составляющую силы реакции. Тангенциальная же составляющая сил притяжения на практике близка к нулю. Образующийся при этом треугольник сил, действующий между телами в зоне контакта, имеет вид, представленный на рис. 3.1.

Исходя из треугольника сил, действующих между телами, тангенциальная и нормальная составляющие вектора равнодействующих сил отталкивания определяются следующим образом:

$$R_T = F + A_T; R_N = F + A_N.$$

Полагая, что

$$\mu = \frac{R_T}{R_N} = \operatorname{tg}(\alpha),$$

имеем

$$F = \mu \cdot (N + A_N) - A_T.$$

Поскольку  $A_T$  бывает величиной близкой к нулю, выражение представляется как

$$F = \mu \cdot (N + A_N).$$

Принимая во внимание, что нормальная составляющая сил притяжения  $A_N$  равна произведению площади истинного контакта  $S$  на удельное давление контактирующих поверхностей трения  $P_o$ , получают выражение

$$F = \mu \cdot (N + S \cdot P_o) = \mu \cdot N + \mu \cdot S \cdot P_o.$$

Первое слагаемое в правой части формулы определяется силами отталкивания между телами, а второе слагаемое в правой части формулы вызвано силами притяжения. В тех случаях, когда роль адгезии между телами незначительна, двухчленный закон трения Б.В. Дерягина сводится к закону Амонтона

$$F = \mu \cdot N.$$

Развивая теорию трения Б.В. Дерягина для случая граничного тления твердых тел, когда на поверхностях трения находятся псевдокристаллические слои смазочного материала, А.С. Ахматов предлагает учитывать при трении помимо ван-дер-ваальсовых сил притяжения поверхностей трения твердых тел также и силы притяжения граничных смазочных слоев того же происхождения.

В этом случае закон трения Б.В. Дерягина приобретает следующий вид:

$$F = \mu \cdot N + \mu \cdot S \cdot (P_o + P_y),$$

где  $P_y$  - удельная сила притяжения между граничными слоями.

Строгая молекулярная теория трения Б.В.Дерягина, разработанная без учета кинетики молекулярного взаимодействия, является справедливой для абсолютно жестких и абсолютно гладких поверхностей. Расчет же конкретных величин трения по этим формулам сейчас затруднен, поскольку молекулярные характеристики для реальных твердых тел, к сожалению, в настоящее время еще остаются невыясненными.

Взгляды Терцаги на механизм трения нашли дальнейшее развитие в работе Бикермана и Райдила и особенно в работах Боудена и его школы. Согласно учению Боудена соприкосновение поверхностей происходит по выступам, где концентрируются очень большие давления. Под действием этих высоких давлений в точках контакта происходит пластическое течение материалов, при котором возникает значительная адгезия, и обе поверхности в местах контакта образуют как бы одно целое. Для металлов подобный процесс называют холодным свариванием (рис. 3.2). При относительном смещении тел происходит разрушение этих мостиков сварки, а затрачиваемая сила на срез мостиков становится близкой к силе трения. При движении одного тела по другому выступы более твердого тела будут «пропахивать» канавки в более мягком теле. Поэтому сила трения, по мнению ее авторов, представляется в следующем виде:

$$F = S_o \cdot \tau + S \cdot P,$$

где  $F$  - сила трения;  $S_o$  - фактическая площадь контакта;  $\tau$  - сопротивление материала на срез;  $S$  - поперечное сечение дорожки трения (площадь поперечного профиля царапины);  $P$  - удельное сопротивление вытеснения металла, приблизительно равно пределу текучести.

Боуден считает, что адгезия играет основную роль при трении тел, и трение нельзя рассматривать как поверхностное явление. В основе трения лежат объемные свойства материалов, такие, например, как соотношение твердостей трущихся тел, а при достаточно больших скоростях скольжения и соотношение температур плавления тел.

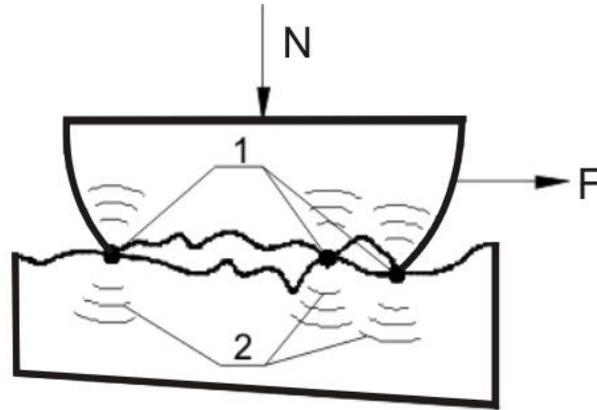


Рис. 3.2. Механизм трения по Ф. Боудену:  
1 - область пластического течения; 2 - область упругой деформации;  
F - сила трения; N - нормальная нагрузка

Ввиду пластического течения материала на выступах поверхности удельное давление тел остается постоянным и не превышает предела текучести. Нормальная нагрузка определяется как произведение площади фактического контакта на предел текучести материала, т.е.

$$N = S_{\phi} \cdot P.$$

С увеличением нормальной нагрузки удельное давление в зоне контакта, приблизительно равное пределу текучести, практически не меняется, а главным образом, происходит увеличение площади фактического контакта. Поэтому коэффициент трения согласно представлению Боудена выражается следующим образом:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{S_{\phi} \cdot \tau + S_1 \cdot P}{S_{\phi} \cdot P} = \frac{\tau}{P} + \frac{S_1}{S_{\phi}}.$$

Пренебрегая сопротивлением пластического оттеснения материала, считая его равным одной десятой и менее от сопротивления разрушения мостиков сварки, коэффициент трения Боуден выразил как отношение сопротивления на срез к пределу текучести более мягкого материала

$$\mu = \frac{\tau}{P}.$$

Развиваемая Боуденом и Тейбором теория является, по существу, справедливой лишь для пластического контакта при условии, что трение происходит при постоянном напряжении.

Взглядов Боудена и Тейбора о трении тел придерживаются Эрнст и Мерцент. Рассматривая контакт трущихся тел как пластический, они предлагают выражение для определения коэффициента трения через отношение сопротивления материала на срез  $\tau$  к твердости  $H$

$$\mu = \frac{\tau}{H}.$$

При трении реальных тел большую роль по формированию трения играют силы, возникающие при взаимном зацеплении выступов, всегда имеющих на поверхностях трения. Поэтому помимо поверхностного взаимодействия ненасыщенных силовых полей соприкасающихся тел, на трение начинают оказывать влияние и объемные механические процессы. В деформационный процесс, сопровождающий трение, втягиваются массы материала (трущихся тел), значительно превышающие массу мономолекулярного поверхностного слоя.

По этому поводу П.А. Ребиндер и Г.И.Епифанов указывали, что в общем случае при трении протекают следующие процессы:

- 1) упругое и пластическое деформирование микронеровностей и пластическое течение в поверхностных слоях, приводящие к пластическому износу;
- 2) повторные микропластические деформации при периодических встречах микронеровностей, приводящие к установленному разрушению;
- 3) изменение механических и физических свойств поверхностных слоев металла вследствие глубокой пластической деформации.

Поэтому становится понятным то большое внимание, которое уделяется процессу деформирования (сдвигообразования) при трении в работах многих исследователей, таких как С.Я. Вейлер, И.В. Крагельский, Г.И. Епифанов, В.И. Лихтман, Д.М. Толстой и др.

Г.И. Епифанов считает, что в процессе трения пластически деформируются довольно толстые поверхностные слои. В опытах со сферическим ползуном и резцом с фаской им было установлено, что впереди движущегося индентора образуется застойная зона *ОАБ* (рис. 3.3) более слабого элемента фрикционной пары. За площадь среза принимается площадь внутренней границы *ОБ* застой-

ной зоны *ОАВ*. Истинной площадью трения является суммарная площадь сдвига, образующегося в процессе трения.

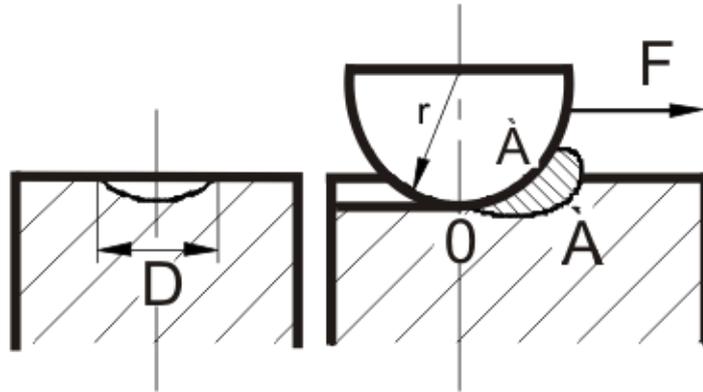


Рис. 3.3. Механизм трения по Г.И. Епифанову

При исследовании трения и адгезии свежеработанных полусферических образцов из меди, латуни, технического железа, магниевого сплава, скорлупы кокосового ореха и слоновой кости по олову и свинцу оказалось, что трение во всех опытах примерно одинаковое; адгезия для неметаллов большая, а для металлов - ничтожная. Это позволило автору считать, что адгезия не играет первостепенной роли в процессе формирования силы трения. Сила трения определяется в основном сопротивлением на сдвиг более мягкого материала. Для определения силы трения Г.И. Епифанов предлагает формулу следующего вида:

$$F = S_{\text{сд}} \cdot \tau,$$

где  $\tau$  - прочность материала на сдвиг;  $S_{\text{сд}}$  - площадь сдвига.

В силу того, что прочность материала меняется с изменением сжимающего усилия между контактирующими телами, формула для определения силы трения преобразуется следующим образом.

Зависимость прочности материала на сдвиг от нормального давления принимается линейной

$$\tau = \tau_0 + K \cdot P,$$

где  $\tau_0$  - прочность материала на сдвиг при нормальном давлении, равном нулю;  $P$  - нормальное давление;  $K = d\tau/dP$  - коэффициент пропорциональности между  $\tau$  и  $P$ .

Коэффициент  $K$  находится из условия, когда отрицательное давление становится равным адгезии  $d_0$ , т.е. когда

$$\tau = K \cdot d_0.$$

Тогда

$$K = \frac{\tau}{d_0}.$$

После этого преобразования выражение для силы трения принимает вид

$$F = S_{\text{сд}} \cdot \tau_0 + S_{\text{сд}} \cdot K \cdot P = S_{\text{сд}} \cdot \tau + K \cdot N,$$

где  $N$  - нормальная нагрузка (на рис. 3.3 не указана).

В случае смазки трущихся тел тонкими пленками Г.И. Епифанов предлагает выразить силу трения следующим образом:

$$F = S_{\text{сд1}} \cdot \tau_1 + S_{\text{сд2}} \cdot \tau_2,$$

где  $S_{\text{сд1}}$  - площадь сдвига в пленке;  $S_{\text{сд2}}$  - площадь поперечного сечения дорожки трения (пропахивания);  $\tau_1$  - напряжение сдвига пленки;  $\tau_2$  - сопротивление основного металла пластическому оттеснению.

Дальнейшее развитие атомно-молекулярной теории трения нашло отражение в работах В.А. Буфеева. В своих работах В.А. Буфеев вскрывает и исследует осцилляторный избирательно-резонансный механизм внешнего трения и предлагает весьма оригинальную макроскопическую теорию трения на базе термодинамики неравновесных процессов и теоремы Умова. Автор этой теоремы считает, что при трении твердых тел основными каналами диссипации энергии являются тепловой, электромагнитный и волновой. Данная теория трения представляет большой научный интерес и после проведения дополнительной экспериментальной проверки может найти широкое распространение при решении практических задач.

Значительным этапом развития в учении о трении было признание возможности наличия упругих деформаций контактирующих неровностей, выдвинутое впервые И.В. Крагельским еще в 1939-1941 гг. На основе этих представлений, с учетом современного развития учения о трении и двух основополагающих работ по внешнему трению И.В. Крагельского и А.В. Чичинадзе, была разработана молекулярно-механическая теория трения, которая получила наибольшее признание.

Молекулярно-механическая теория рассматривает двойственный процесс трения, заключающийся в преодолении адгезионных связей, возникающих на площадках фактического контакта, и в объемном деформировании внедрившимися неровностями тонкого по-

верхностного слоя. Трение определяется как результат взаимодействия всех выступов, имеющих на реальном контакте. Оно зависит от микрогеометрии (высоты максимальной неровности, его радиуса закругления и показателей параболы, выражающей опорную поверхность), механических свойств (модуля упругости или твердости и прочности адгезионной связи) и внешних условий (нагрузки и скорости скольжения тел). Предполагается, что влияние температуры проявляется через изменение механических свойств трущихся тел.

В результате совместного рассмотрения задач теории упругости и пластичности И.В. Крагельским и Н.М. Михиным была получена следующая трехчленная формула, представляющая в общем случае величину граничного трения

$$f = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + k \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{R}},$$

где  $\tau_0$  - прочность на срез адгезионной связи;  $P_r$  - средние нормальные напряжения на контакте;  $\beta$  - пьезокоэффициент, характеризующий прочность на срез при увеличении нормального напряжения;  $k$  - коэффициент, зависящий от вида контакта;  $h$  - величина внедрения;  $R$  - радиус неровности;  $\alpha$  - коэффициент гистерезисных потерь.

Авторы молекулярно-механической теории трения утверждают, что она еще далека от своего завершения. На существующем уровне теория позволяет вычислять коэффициент трения по физико-механическим и микрогеометрическим характеристикам трущихся тел для случая трения покоя и при стационарных режимах трения, при условии слабо выраженных реологических свойств материала. Кроме того, она позволяет формулировать требования к физико-механическим характеристикам материалов, а также регламентировать технологию обработки. Становится ясным, что легче воздействовать на коэффициент трения в условиях упругого контакта, чем пластического. При упругом контакте это достигается путем регулирования давления и величины адгезионной составляющей. В условиях пластического контакта регулировать трение труднее. В связи с большим значением фактического давления желательно было бы иметь возможность воздействовать на пьезокоэффициент, но, к сожалению, он мало изучен. В условиях нестационарных режимов трения и при условии ярко выраженных реологических свойств материалов представляется возможным прогнозировать диапазон изменения коэффициента

трения. Построение же аналитических зависимостей в этом случае представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Большинство имеющихся в настоящее время теорий трения твердых тел не учитывают изменений, происходящих в контактной зоне в процессе трения (таких, как изменение шероховатости, механических свойств, зависящих от температуры трения и времени контакта, механико-химических процессов).

Обобщая существующее состояние учения о трении твердых тел, можно заключить, что трение - это сложный процесс взаимодействия между телами, в основе которого проявляются как механические, физико-химические, электрические, так и другие явления. Трение является результатом воздействия многих факторов, пока трудно поддающихся учету. Одним из сложных является учет механических и физических характеристик поверхностных слоев твердых тел, меняющихся под влиянием физико-химических и механохимических факторов.

Пока еще не всегда удается количественно прогнозировать влияние на трение этих эффектов и приходится использовать результаты частных экспериментов для получения удельных характеристик, позволяющих рассчитывать процесс при других условиях. Следует всегда учитывать и то обстоятельство, что каждый из законов природы, в том числе и законы трения, имеет свои границы применения. Значение же разных подходов и соответствующих законов для объяснения природы фрикционного взаимодействия трущихся тел вооружает инженера и исследователя базовыми положениями и объяснениями процессов для решения производственных задач по совершенствованию работы узлов трения конкретных машин и механизмов.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Что общего в законах трения Леонардо да Винчи и Амонтона? Какие факторы согласно учению Амонтона определяют коэффициент трения между твердыми телами?
2. Каковы особенности закона трения Кулона и способы его обоснования?
3. Что нового внесли в учение о трении Дезаголье, Бриллюэн, Гарди, Терцаги и Томлисон?
4. Опишите молекулярную теорию трения Б.В. Дерягина.
5. Каковы взгляды Ф. Бодена на природу формирования сил трения?

6. Каковы особенности подхода Г.И. Епифанова к условиям образования сил трения?
7. Сформулируйте теорию трения И.В. Крагельского.
8. Каковы пути дальнейшего развития учения о трении?

#### **Глава 4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВА ТРУЩИХСЯ ТЕЛ**

Реальная машина состоит из твердых тел и применяемых в ней жидких и пластичных смазочных материалов, которые в свою очередь взаимодействуют с окружающей средой, представляющей собой смесь газов - паров всевозможных веществ и пыли. От того, как взаимодействуют эти материалы и как они меняются по составу и свойствам в процессе трения, во многом определяется уровень трения и износа трущихся тел и многие параметры и характеристики машин.

Основы твердых тел, жидкостей и газов составляют взаимодействующие между собой атомы, ионы и молекулы. Им присуще наличие молекулярных сил, поступательное и вращательное движение, протекание химических и других процессов, что, в конечном счете, определяется соотношениями между потенциальной и кинетической энергиями частиц и их групп.

##### **4.1. Характер взаимодействия между атомами, ионами и молекулами**

Атомы, ионы и молекулы представляют собой частицы, несущие электрические заряды, способные с изменением расстояния  $Z$  взаимодействовать между собой (рис. 4.1). Независимо от природы их взаимодействия (наличия ионной, ковалентной, металлической или молекулярной связи) им свойственно качественно общий ход изменения сил  $f$  и потенциальной энергии  $E_{пот}$  с изменением расстояния между собой. Для первоначально электрически нейтральных и уже заряженных (например, ионов) частиц характерно появление сил притяжения  $f_{пр}$  на расстоянии порядка 2...3 их диаметра с последующим увеличением при их приближении, в общем случае, согласно уравнению вида

$$f_{пр} = -\frac{m \cdot A}{r^{m+1}}.$$

Силы отталкивания начинают действовать между частицами на более близких расстояниях. При последующем их сближении они резко увеличиваются согласно уравнению вида

$$f_{\text{отт}} = \frac{n \cdot B}{r^{n+1}},$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные, зависящие от природы взаимодействующих «тел» (молекул, атомов, ионов);  $r$  – расстояние между этими «телами»;  $m$  и  $n$  – константы, зависящие от природы тел (чаще всего  $n = 6 \dots 7$ ;  $m = 8 \dots 12$ ).

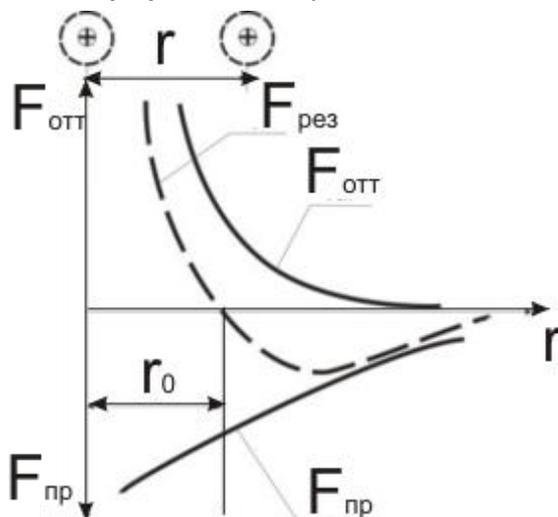


Рис. 4.1. Силы взаимодействия между двумя атомными частицами в зависимости от расстояния между ними

Результирующая этих сил определяется их суммированием

$$f_{\text{рез}} = f_{\text{пр}} + f_{\text{отт}} = -\frac{m \cdot A}{r^{m+1}} + \frac{n \cdot B}{r^{n+1}}.$$

Зная, что  $f = -dE/dr$ , суммарную потенциальную энергию взаимодействия (рис. 4.2) можно определить как

$$E_{\text{пот}} = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n}.$$

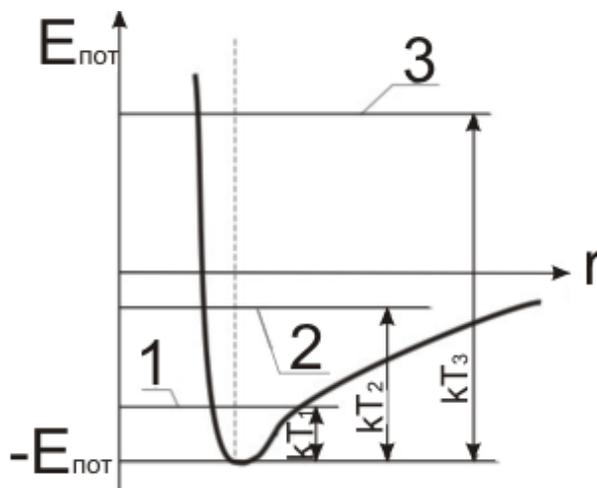


Рис. 4.2. Потенциальная энергия взаимодействия между атомными частицами у твердых тел, жидкостей и газов, обусловленная изменением температуры: 1 – твердое тело; 2 – жидкость; 3 – газ (пар)

Под действием таких сил тела стремятся в пространстве к положению с минимумом потенциальной энергии, т.е. на расстоянии друг от друга (при температуре, соответствующей абсолютному нулю), когда сила взаимодействия между взаимодействующими частицами становится равной нулю. Абсолютные же значения этого минимума потенциальной энергии и расстояние  $r_0$  для разного вида атомов, ионов и молекул и видов связи различны (табл. 4.1).

Таблица 4.1

## Энергия разрыва различных видов связи

Вид связи	Энергия разрыва, эВ
Ионная	7,5...9,0
Ковалентная	5,5...6,5
Металлическая	2,0...3,0
Ван-дер-Ваальсова	0,1

По своей величине Ван-дер-Ваальсовы силы значительно меньше ионных или ковалентных сил, однако они обладают некоторыми уникальными свойствами, которые в определенных ситуациях делают их доминирующими силами. Прежде всего Ван-дер-Ваальсовы силы универсальны и сохраняют значительную величину при сравнительно больших расстояниях между молекулами. Они определяют не только взаимодействие между твердыми телами, но и процессы, протекающие на поверхностях их раздела. С ними связаны такие явления, как физическая адсорбция, смачивание и слипание поверхностей твердых тел, устойчивость коллоидов, формирование поверхностных слоев и ряд других явлений. Тем самым действие Ван-дер-Ваальсовых сил может оказать большое влияние при внешнем, внутреннем и граничном видах трения.

С повышением температуры возрастает скорость, т.е. кинематическая энергия частиц, составляющих тело, прямо пропорциональна его абсолютной температуре

$$E_{кин} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T.$$

В зависимости от соотношения между  $E_{пот}$  и  $E_{кин}$  группы взаимодействующих частиц образуются твердые тела, жидкости или газы. В твердых телах (для которых характерно  $(E_{пот})_{min} > E_{кин}$ ) совершается колебательное движение его частиц относительно своего

мгновенного центра равновесия (несколько больше чем  $r_0$ ) и происходит увеличение размеров тел при их нагреве.

В условиях, когда  $E_{кин}$  по своей величине приближается к  $(E_{ном})_{min}$ , система приобретает свойства жидкости с характерными для нее признаками.

В тех же случаях, когда  $E_{кин}$  становится больше  $(E_{ном})_{min}$ , система приобретает свойства пара (газа), для которого основу взаимодействия между частицами составляют силы электростатического отталкивания, с характерными для данного материала свойствами.

Высокая степень влияния температуры сконденсированных тел на весьма значительное изменение их свойств и характер взаимодействия между собой требует неременного учета тепловых процессов, сопровождающих любое фрикционное взаимодействие между телами. Степень его влияния может быть разной. В отдельных случаях, как, например, при статическом трении, она может быть незначительной. В тяжело нагруженных узлах трения за счет выделяющегося тепла твердые тела могут весьма значительно менять свои свойства, переходить в жидкое, а затем и парообразное состояние. Эти процессы существенно влияют на сам характер протекания фрикционного взаимодействия между телами. Так, например, без плавления льда под полозом конькобежца невозможно было бы получить столь низкие коэффициенты трения между этими телами. Сейчас этот принцип широко используется при выборе материалов для управления фрикционным взаимодействием в узлах трения. Аналогичные процессы имеют важное значение и при охлаждении материалов. Так, известно, что такие газы, как криптон и ряд других, в исходном состоянии обладающие очень малой вязкостью, с понижением температуры переходят в жидкое, а затем и твердое состояние. При этом в твердом состоянии они весьма значительно меняют свои свойства и оказываются способными реализовать коэффициенты трения, равные 0,7.

С повышением (понижением) температуры помимо изменения фазового состояния трущихся тел в сконденсированных телах могут происходить и фазовые переходы, термомеханические процессы, инициируется протекание химических реакций и ряд других явлений, способных значительно менять механические и химические свойства взаимодействующих материалов, что, в свою очередь, влияет на уровень трения и интенсивность изнашивания фрикционных пар.

## 4.2. Кристаллические и аморфные тела

В процессе конденсации частицы вещества стремятся занять места в пространстве, соответствующие их минимуму потенциальной энергии. Сконденсированные тела, которые приобрели способность обладать упругими свойствами, получили название твердых тел. Твердые тела по их строению и свойствам разделяются на кристаллические и аморфные.

Для *кристаллических тел* характерными являются далеко распространённые строго направленные связи с вполне определенными расстояниями и *анизотропией* (неоднородностью) физических, механических и других свойств материала. При нагреве до температуры плавления кристаллического тела требуется затрата дополнительной энергии, необходимой для разрушения кристаллической решетки, а рост температуры в момент достижения температуры плавления прекращается. При охлаждении же до этой температуры происходит обратный процесс - выделение тепла, и температура также не меняется в течение некоторого времени. К группе кристаллических тел относятся металлы, минералы и подобные им материалы.

У *аморфных тел* межатомные связи распространяются на небольшие расстояния, и взаимная ориентация сохраняется только между близлежащими частицами. Аморфные тела по своей структуре в известной степени напоминают жидкость, отличаясь от последней лишь меньшим межатомным расстоянием и подвижностью атомов. Им свойственна *изотропия* (однородность) физических и других свойств в разных направлениях. Переход у подобных тел из твердого в жидкое состояние происходит монотонно (без скачков температур). Характерными представителями аморфных тел являются стекло, смолы, многие полимеры и т.д.

При одних и тех же температурах и давлениях аморфные тела обладают большим удельным объемом, большей внутренней энергией и большей энтропией по сравнению с кристаллическими телами. Благодаря этому аморфные тела можно рассматривать и как тела, находящиеся в метастабильном состоянии, которое с течением времени (возможно, и чрезвычайно длительного) должно самопроизвольно закристаллизоваться. Поэтому наибольший интерес с точки зрения строения и свойств материалов имеют кристаллические тела, хотя при фрикционных процессах большое влияние могут оказывать и аморфные тела.

### 4.3. Монокристаллы и поликристаллы. Элементарная кристаллическая ячейка

В процессе конденсации атомы, ионы и молекулы, занимая относительно друг друга в пространстве положение с минимумом потенциальной энергии, образуют единую кристаллическую решетку вещества, получившего название *монокристалла*. Если в кристаллизационном объеме одновременно зарождается большое количество кристаллов, то образовавшееся в таких условиях твердое тело (поликристалл) представляет собой конгломерат сросшихся между собой беспорядочно расположенных кристаллов неопределенной формы (кристаллитов) с размерами чаще всего от 1 до  $10^{-3}$  см. В поликристалле кристаллиты отделены друг от друга межкристаллической прослойкой, в которой несколько нарушается порядок атомов (рис. 4.3). И если в каждом из кристаллитов наблюдается явно выраженная анизотропия его свойств, то поликристалл в целом обладает уже некоторой усредненной изотропией физических свойств. Наименьшим элементом кристалла, достаточно полно отражающим его свойства, является *элементарная кристаллографическая ячейка* (рис. 4.4, табл. 4.2). Наиболее распространенными ячейками являются: гранецентрированная кубическая (ГЦК), объемно-центрированная кубическая (ОЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ). Многократным повторением элементарных ячеек в трех направлениях можно получить монокристалл в целом. В таком кристалле механические и другие свойства во многом определяются межатомными расстояниями по различным направлениям.

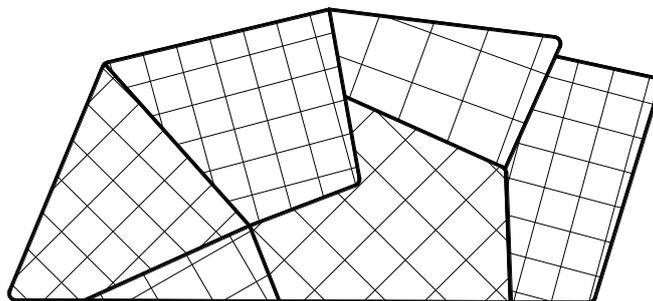


Рис. 4.3. Схематическое изображение межкристаллических прослоек в поликристалле

Так, если в кристалле (рис. 4.5)  $b > c > a$ , то и прочность на разрыв в нем через плоскость, проходящую перпендикулярно плоскости чертежа и ось  $OB$ , меньше, чем через плоскости, проходящие вдоль  $OC$  и  $OA$ . Эта разница у кристаллов может достигать как нескольких про-

центров, так и нескольких раз. Благодаря этому у многих кристаллов имеются явно выраженные *слабые и сильные плоскости скольжения*, по-разному реагирующие на воздействие внешних сил.

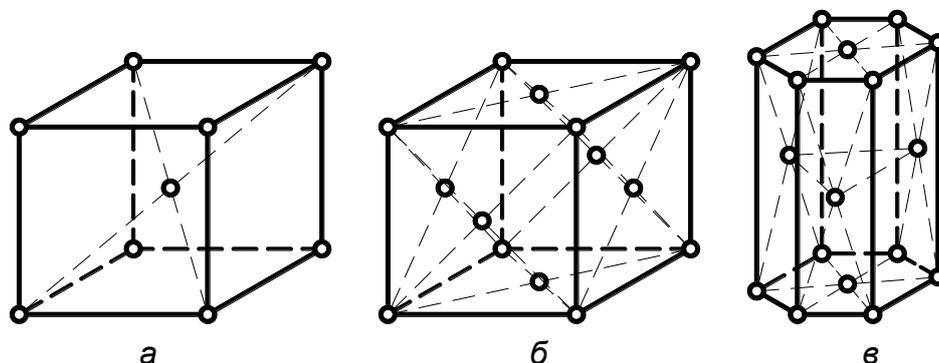


Рис. 4.4. Наиболее характерные и распространенные элементарные ячейки твердых тел: а - ОЦК; б - ГЦК; в - ГПУ

Таблица 4.2

#### Кристаллические решетки различных металлов

ОЦК	Li, Na, K, V, Ta, $\alpha$ -Cr, Mo, W, $\alpha$ -Fe
ГЦК	Cu, Ag, Au, Al, Th, Pb, $\gamma$ -Fe, $\alpha$ -Co, Ni, Ph, Pd, Jr, Pt
ГПУ	Be, Mg, Zn, Cd, Tl, Ti, Zr, He, Ru, Ds

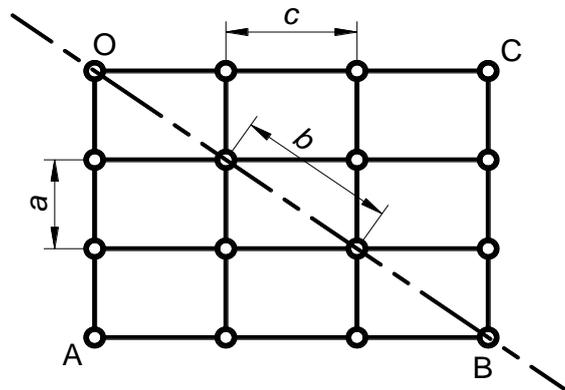


Рис. 4.5. Анизотропия свойств кристаллических тел

## 4.4 Теоретическая и реальная прочность твердых тел.

### Дефекты структуры

Используя представления о структуре твердых тел и материале его частиц, можно рассчитать их действительную прочность. Расчеты для ряда реальных тел показывают, что их теоретическая прочность в 100...10000 раз отличается от прочности, реализуемой реальными телами. Причиной тому являются дефекты структуры реальных тел. Среди них наиболее распространенными являются: точечные дефекты, линейные дефекты, поверхностные неоднородности и объемные неоднородности материала.

**Точечные дефекты.** В процессе кристаллизации или в результате взаимодействия с внешними силами внутренняя структура кристаллических тел может приобрести существенные изменения. Эти изменения (рис. 4.6) могут проявиться в виде «дырки» (1) - случай, когда в одном из мест кристаллической решетки отсутствуют тот или иной атом или появляется дефект; «внедрения» (2) - случай, когда одна из частиц кристаллической решетки застревает в ее междуузле или дефекта «замещения» (3) - случай, когда необходимый вид частицы решетки случайно заполняется частицей совершенно иного сорта.

Каждый из этих дефектов вносит дополнительные напряжения в кристаллическую решетку твердого тела и уменьшает его прочность.

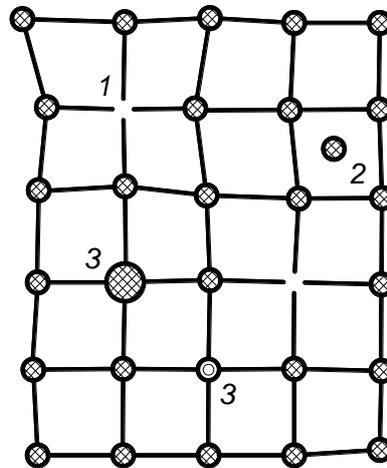


Рис. 4.6. Точечные дефекты кристаллических тел

**Линейные дефекты.** В процессе кристаллизации образуются блоки кристаллической решетки, несколько сдвинутые по направлениям. Границы же блоков представляют собой области с нарушенными структурами, а, следовательно, и с характером взаимодействия между частицами, их составляющими. В тоже время, под действием внешних сил в структуре кристаллических тел могут произойти смещения частиц, приводящие к нарушениям в строении кристаллических тел. Геометрические формы линейных дефектов очень сложные, однако предельные их случаи - краевая и винтовая формы - могут быть представлены в виде схем (рис. 4.7, 4.8).

Линейные нарушения чередования атомных плоскостей в кристаллической решетке твердых тел получили название *дислокации*. В переводе с греческого языка это слово означает смещение. Смещение в кристаллических решетках приводит к возникновению дополнительных концентраций напряжений и, как следствие, к существенно-

му изменению прочности твердых тел. На рис. 4.9 показано, что с увеличение плотности дислокаций в материале  $\rho$  модуль Юнга  $E$  резко уменьшается и после перехода некоторого минимума несколько повышается за счет выхода дислокаций на границы зерен или поверхность, а также за счет их взаимного наложения и компенсации.

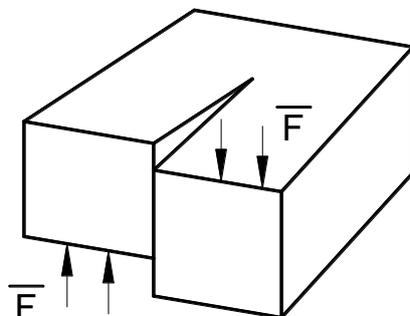


Рис. 4.7. Схематическое изображение линейного дефекта в виде винтовой дислокации

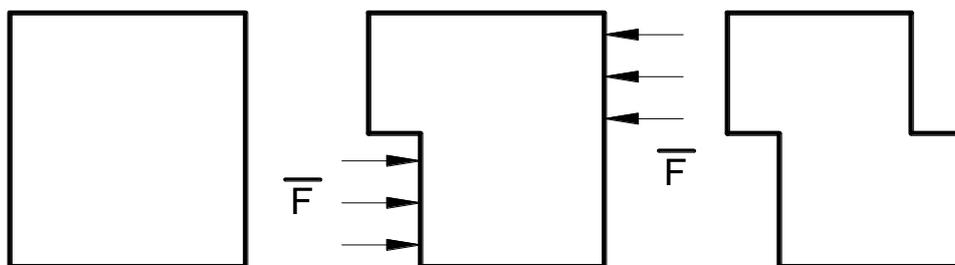


Рис. 4.8. Схематическое изображение линейного дефекта в виде сдвиговой дислокации

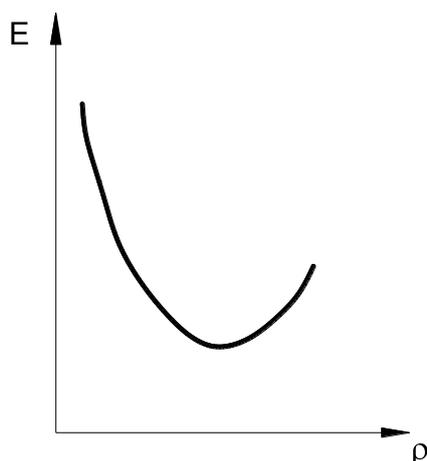


Рис. 4.9. Зависимость сопротивления деформации от плотности дислокаций

*Поверхностные (двухмерные) неоднородности* представляют собой дефекты поверхности границ зерен и дефекты упаковки, возникающие как при зарождении кристаллов, так и в процессе их эксплуатации.

*Объемные (трехмерные) неоднородности* представляют собой аморфные области, поры, трещины, а также всевозможные включения.

#### 4.5. Рельеф поверхности твердых тел

Поверхностям твердых тел всегда присущи отклонения от идеальной геометрической формы. Причиной тому являются дефекты поверхности, появляющиеся в процессе формирования самих твердых тел, в результате их взаимодействия с окружающей средой, в процессе обработки этих материалов на специальном оборудовании и при эксплуатации машин.

Качество поверхности деталей машин во многом влияет на многие свойства твердых тел таких, например, как сопротивление усталостному разрушению, износостойкость, коррозионную стойкость и ряд других свойств трущихся тел и машин в целом.

Макро- и микрогеометрия поверхности твердых тел формируется как в процессе изготовления, так и при эксплуатации узлов трения. В процессе изготовления деталей по ряду причин, чаще всего связанных с техническим состоянием оборудования, они приобретают форму поверхности, отличную от заданной по чертежу (рис. 4.10). Среди дефектов поверхности наиболее характерными являются микроотклонения (в виде выпуклостей, вогнутостей, конусности образующей деталей и т.п.), волнистость и шероховатость.

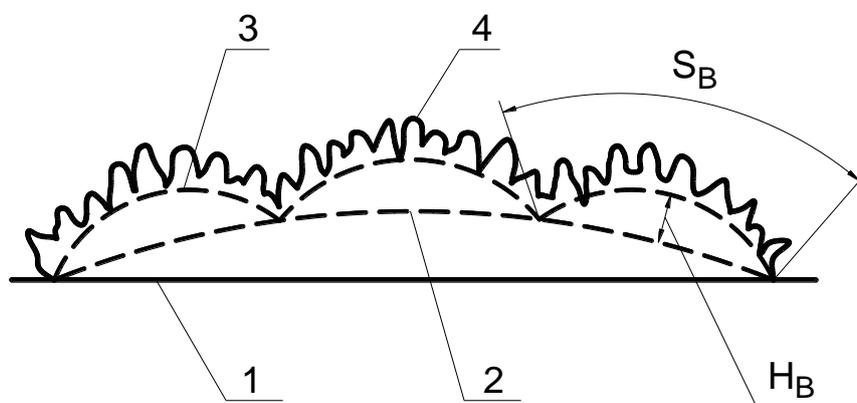


Рис. 4.10. Схема шероховатости твердых тел: 1 – форма по чертежу; 2 – макроотклонения; 3 – волнистость; 4 – шероховатость

*Волнистость* представляет собой совокупность периодических, регулярно повторяющихся микровыступов и макровпадин, когда шаг, образуемой ими волны  $S_B$ , более чем в 40 раз превышает ее высоту  $H_B$ .

Под *шероховатостью* подразумевается совокупность неровностей с относительно малым шагом 2...800 мкм и высотой 0,03...400 мкм.

Шероховатость и волнистость твердых тел можно оценить, с помощью измерительного прибора профилограф-профилометр. Этот

прибор с помощью специальной иглы (с радиусом закругления 2...10 мкм), перемещающейся по исследуемой поверхности, воспроизводит ее рельеф в увеличенном масштабе. Пример такой профилограммы представлен на рис 4.11.

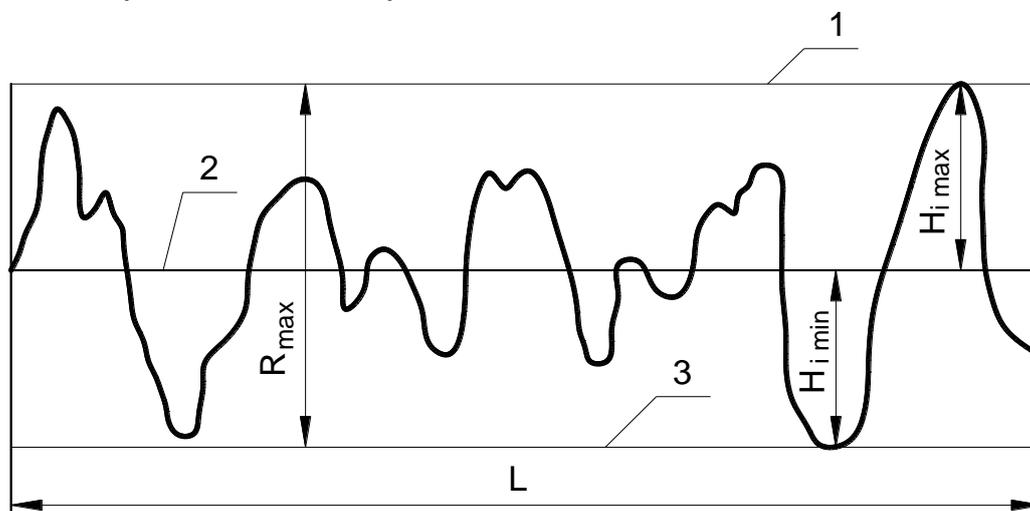


Рис. 4.11. Профилограмма поверхности: 1 – линия выступов; 2 – средняя линия; 3 – линия впадин

Пользуясь профилограммой, можно определить среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии

$$R_a = \frac{\sum y_i}{n},$$

где  $y_i$  - расстояние некоторой точки профиля от средней линии;  $n$  - число точек профиля.

Для этого на профилограмме обычно берут базовую длину  $L$ , на которой находится пять наибольших максимумов и пять минимумов. При разделении базовой длины на  $n$  участков повышается точность расчетов.

Используя профилограмму поверхности, определяют также и среднее арифметическое отклонение неровностей по десяти точкам

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 (H_i)_{\max} + \sum_{i=1}^5 (H_i)_{\min}}{5},$$

где  $H_i$  - расстояние расчетных точек от средней линии.

Для большинства обрабатываемых твердых тел  $R_a$  меняется в интервале от 100 до 0,008 мкм, а  $R_z$  - от 1600 до 0,025 мкм. Несколько большую величину, чем  $R_z$ , имеет *наибольшая высота профиля*  $R_{max}$ , определяющая расстояние между самой высокой точкой выступов и самой низкой точкой впадин.

Аналогичные характеристики шероховатости поверхности можно получить и для поверхностей деталей узлов трения.

Используя профилограмму поверхности твердого тела, можно построить *кривую опорной поверхности*. Она характеризует степень возрастания площади сечения микровыступов поверхности твердого тела по мере перехода от линии (плоскости) выступов к линии (плоскости) впадин. Строится она посредством суммирования площади выступов  $\eta_R = \sum \Delta l_i$  на определенном удалении  $R$  от линии выступов (рис. 4.12).

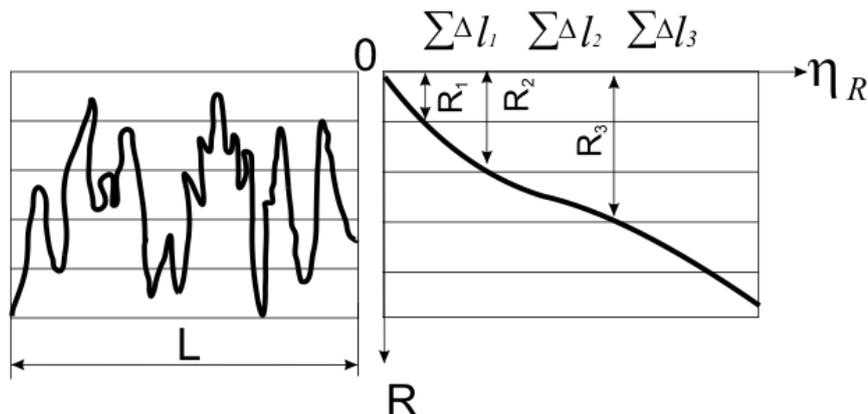


Рис. 4.12. Профилограмма и опорная поверхность твердого тела

Достаточно часто при проведении расчетов сил трения и износа пользуются *комплексной характеристикой шероховатости* поверхности, имеющей вид

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{r} \cdot B^{1/\nu},$$

где  $r$  - средний радиус кривизны вершин выступов;  $R_{\max}$  - расстояние между линиями выступов и впадин;  $B$ ,  $\nu$  - параметры опорной кривой, характеризующей распределение материала по высоте шероховатого слоя.

Для наиболее распространенных в машиностроении шероховатых поверхностей  $B=2$ ,  $\nu=2$ . На таких поверхностях также имеются нанощероховатости, обусловленные уже отдельными кристаллитами, из которых и формируется твердое тело (рис. 4.3 и 4.15).

#### 4.6. Микродефекты поверхности.

##### Внешняя и внутренняя поверхности твердого тела

Любая шероховатая поверхность твердого тела постоянно взаимодействует с внешней средой. Развивающиеся окислительные процессы способствуют образованию на поверхности твердого тела окисных пленок. С течением времени они увеличиваются по толщине.

Ввиду неоднородности строения поверхности окислительные процессы протекают на ее участках с разными скоростями и образуют пленки разной толщины.

Образующиеся под воздействием внешних факторов поверхностные и подповерхностные трещины имеют весьма разветвленную систему. Площадь внутренней поверхности трещин бывает очень значительной и часто в несколько раз превосходит площадь внешней поверхности твердого тела (рис. 4.13).

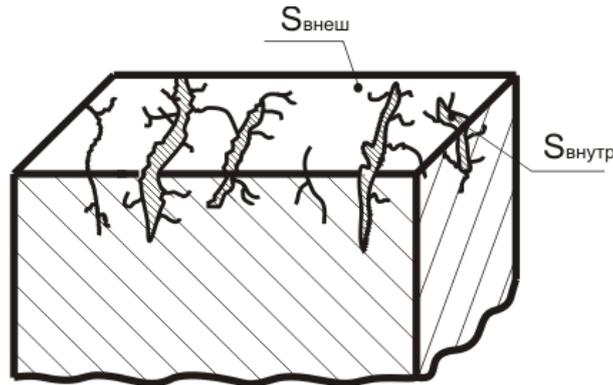


Рис. 4.13. Схема дефектов поверхности твердого тела

Опорная поверхность, а также представления о состоянии и свойствах материала поверхностного слоя, позволяют судить о напряженном состоянии материала в зоне контакта трущихся тел, во многом определяющем закономерности трения и изнашивания твердых тел.

#### **4.7. Физико-химические свойства поверхностей трения твердых тел. Свободная поверхностная энергия твердых тел. Адсорбция**

Атомы, ионы и молекулы, находящиеся внутри твердого тела, испытывают со стороны окружающих их частиц сильное взаимодействие во всех возможных направлениях, причем результирующая этих сил равняется нулю, а сами частицы занимают положение, соответствующее минимуму их потенциальной энергии. Частицы же твердого тела, находящиеся на границе раздела с другой фазой, например, вакуумом, газом или жидкостью, где частиц нет вообще или они находятся в значительно меньшей концентрации, имеют полностью или частично нескомпенсированные связи (рис. 4.14), направленные в сторону этой среды, и испытывают избыточное силовое воздействие со стороны частиц твердого тела, которое стремится втянуть частицы поверхностного слоя внутрь более плотной среды.

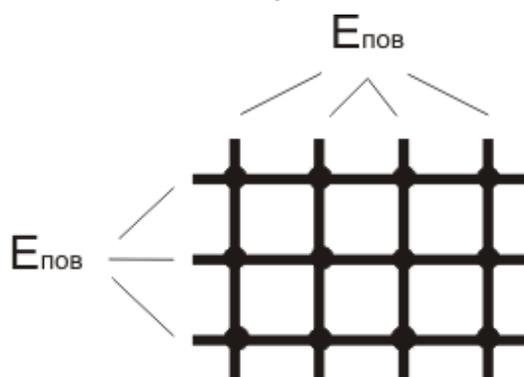


Рис. 4.14. Нескомпенсированные молекулярные поля поверхности  $E_{\text{пов}}$  раздела двух фазовых состояний материалов

Наличие нескомпенсированных сил у частиц поверхностного слоя свидетельствует о том, что они обладают избыточной энергией по сравнению с аналогичными им частицами, находящимися в объеме. Эта энергия получила название *избыточной свободной энергии*, а будучи отнесенной к единице поверхности - *удельной поверхностной энергии*. Благодаря этому частицы, находящиеся на поверхности раздела фаз, занимают менее выгодное энергетическое положение. Однако их частицы закреплены в пространстве и не могут свободно перемещаться. Электрические поля свободной поверхностной энергии твердых тел являются дискретными вдоль поверхности твердого тела и анизотропны, как и сам кристалл. Особенность энергетического положения молекул поверхностного слоя твердых тел оказывает влияние и на многие их свойства. Например, для того чтобы увеличить поверхность твердого тела, при изометрическом процессе, необходимо совершить дополнительную работу внешних сил, эквивалентную увеличению свободной поверхностной энергии этого тела. Наличие нескомпенсированных молекулярных связей у молекул поверхностного слоя твердого тела приводит к тому, что молекулы газа или жидкости стремятся вступить с ними во взаимодействие (рис. 4.15).

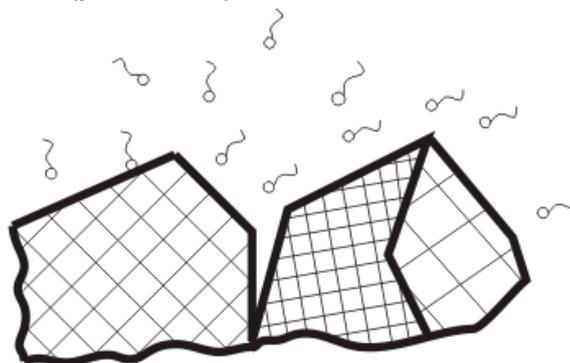


Рис. 4.15. Адсорбция молекул на поверхности твердого тела

В результате этого на твердой поверхности появляются инородные молекулы, понижающие его поверхностную энергию и изменяющие соответственно свойства твердого тела. Процесс поглощения (сгущения) вещества на границе раздела фаз получил название *адсорбции*. Вещество, на поверхности которого происходит адсорбция, называется *адсорбентом*, а поглощаемое из объема вещество - *адсорбатом*. Пропорционально уменьшению свободной поверхностной энергии твердого тела при адсорбции выделяется тепло.

Различают два вида адсорбции: физическую - обратимую, обусловленную действием относительно слабых Ван-дер-Ваальсовых сил, и хемосорбцию - необратимую и обусловленную проявлением достаточно больших по величине химических связей (валентных сил). Поверхность твердого тела гетерогенная, и ее участки обладают одинаковыми адсорбционными свойствами. Так, различные микродефекты поверхности обладают значительно большей способностью к адсорбированию, чем гладкие участки. Их называют обычно активными центрами. Общая площадь активных центров на поверхности твердых тел невелика, но тем не менее их значение во многих процессах бывает огромным.

Анизотропия свойств кристаллических тел и, в частности, их поверхностной энергии является причиной того, что адсорбционные процессы протекают неодинаково на различных границах кристалла. Для твердых тел свойственна и внутренняя адсорбция адсорбента, протекающая на внутренних поверхностях твердых тел (на границах зерен или дефектах его структуры).

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Что представляет основу окружающих нас твердых тел, жидкостей и газов?
2. Каковы особенности молекулярного взаимодействия между частицами, окружающими нас?
3. Каковы условия перехода материалов из твердого состояния в жидкое и газы?
4. Что такое силы отталкивания и притяжения; потенциальная и кинетическая энергия при взаимодействии частиц? Каковы условия их равновесия?
5. Что представляют собой кристаллические и аморфные тела; каковы их особенности и характеристики?

6. Что представляют собой монокристаллы? Каковы особенности строения и анизотропия их механических свойств?

7. Каково влияние дефектов и дислокаций на механические свойства трущихся тел?

8. Каковы особенности внешней и внутренней поверхностей твердых тел?

9. Что такое свободная поверхностная энергия, и каков характер ее распределения?

10. Каковы разновидности адсорбционных процессов, наблюдающиеся на реальных поверхностях трущихся тел?

## **Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

### **5.1. Контактное взаимодействие гладких поверхностей твердых тел**

Понятие «идеально гладкая» для поверхности является идеализированным, поскольку «идеально гладких» поверхностей в окружающем нас мире нет. Наиболее гладкими можно считать, например, поверхность скола кристалла слюды или другого минерала. Однако если иметь в виду, что кристаллы представляют собой систему атомов или ионов, имеющих свои сферические электрические поля, и расположенные на некотором расстоянии друг от друга, то на самом деле и в этом случае они представляют собой некоторую сложной формы поверхность, образованную рядом сфер, удаленных друг от друга на некоторое расстояние. Поэтому к понятию «идеально гладкой» поверхности следует относиться очень осторожно, понимая при этом, что тонкие взаимодействия, происходящие на микроуровнях, на настоящем уровне развития мы еще неспособны наблюдать, и заведомо оставляем за собой возможность анализировать только процессы, происходящие на надмолекулярном уровне или еще более грубом. В этом случае поверхности, которыми мы будем манипулировать, будем считать гладкими.

При соприкосновении двух гладких реальных тел следует различать явно выраженные номинальную (кажущуюся)  $A_a$ , контурную  $A_c$  и фактическую (истинную)  $A_f$  площади контакта (рис. 5.1), каждая из которых обладает специфическими свойствами.

*Номинальная площадь контакта НПК ( $A_a$ )* - определяется внешними геометрическими размерами контактной зоны этих тел.

*Контурная площадь контакта КПК ( $A_c$ )* представляет собой совокупность пятен контакта, группирующихся на вершинах волн сопри-

касающихся поверхностей. Ее можно зафиксировать по отпечаткам на бумаге, фольге или краске специально вводимых в зону контакта твердых тел.

*Фактическая площадь контакта ФПК ( $A_r$ )* - это совокупность контактов микронеровностей, образующих шероховатость поверхности.

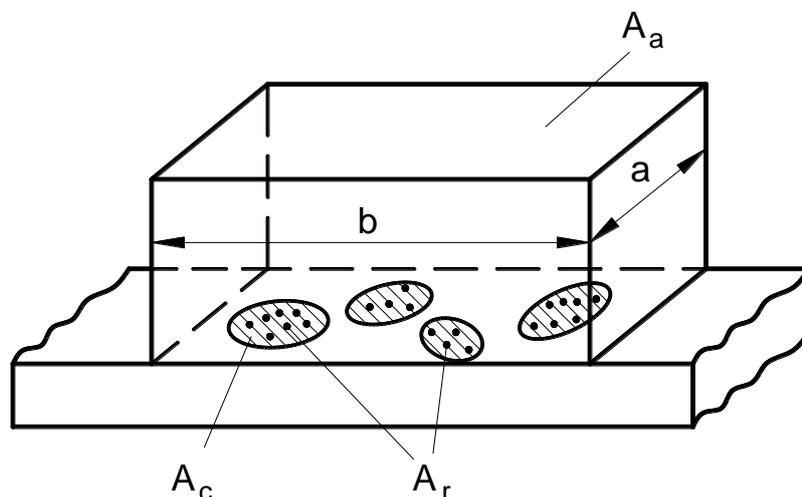


Рис. 5.1. Схема контактирования реальных твердых тел

С увеличением нагрузки фактическая и контурная площади контакта возрастают. Однако для многих случаев и материалов ФПК составляет не более 0,01...0,1 %, а КПК порядка 5...15 % от номинальной площади контактирующих тел. При очень высоких нагрузках и нагреве  $A_c$  приближается к  $A_a$ .

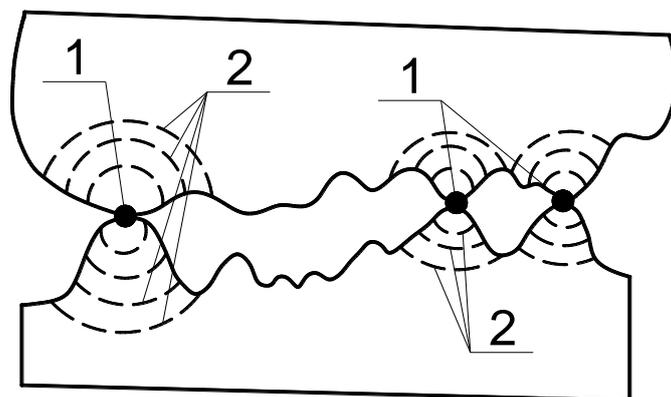


Рис. 5.2. Напряженное состояние контакта реальных твердых тел:  
1 - область пластического течения материала; 2 - область упругой деформации с разными уровнями напряженного состояния материала

Нормальная нагрузка, отнесенная к фактической площади контакта, характеризует фактическое давление  $P_r$ , нагрузка же, отнесенная к контурной площади - контурное давление  $P_c$ . Контурное давление обычно в несколько раз превышает номинальное давление  $P_a$  между телами. Благодаря этому очень часто материал на микровы-

ступях деформируется пластически (рис. 5.2) и становится способным проявлять свои реологические свойства, что сказывается на изменении ряда характеристик материала (например, таких, как сопротивление сдвигу, вязкость и др.) в зависимости от скорости воздействия на тело внешней силы. В то же время на некотором удалении от мест пластического контакта материал деформируется упруго.

## 5.2. Адгезионное взаимодействие между твердыми телами

Теоретические исследования и эксперименты показали, что по мере сближения двух металлических пластин, представляющих собой систему сконденсированных частиц (атомов, ионов, молекул), между ними возникают силы притяжения, в первом приближении обратно пропорциональные четвертой степени от расстояния между гладкими пластинами. На уровень действия этих сил притяжения сильное влияние оказывают шероховатость, дефекты поверхности и адсорбированные на них вещества. Поэтому часто характер этого адгезионного взаимодействия определяют опытным путем.

Сопротивление нормальному отрыву тел одного относительно другого получило название *адгезии* (прилипание). А сила, отнесенная к единице поверхности контактирующих тел - *удельной адгезии*.

В случаях, если силы адгезии оказываются выше сил межатомного взаимодействия одного из тел, и разрыв происходит по объему более слабого тела, то такой вид взаимодействия называют *когезионным*, а само явление - *когезией*.

Примером адгезионного взаимодействия является сварка металлов трением. Наиболее наглядным - любой вид склеивания твердых тел, в том числе и с помощью клея, играющего роль промежуточного тела, увеличивающего площадь истинного контактирования между телами. Особенно высокое адгезионное взаимодействие возможно при контакте свежесформированных поверхностей, например, образующихся между отдельными срезанными выступами в зоне контакта трущихся тел. Как показывают опыты, выполненные в высоком вакууме и в космосе, коэффициенты трения между очищенными металлическими поверхностями могут достигать 10<sup>10</sup> единиц и даже более.

На уровень адгезионного взаимодействия твердых тел, а, следовательно, и трение, оказывает влияние толщина промежуточного нейтрального слоя (рис. 5.3).

На уровень адгезии между телами оказывает влияние толщина окисных слоев, напряженное состояние поверхностей, строение и свойства самих поверхностных слоев и ряд других факторов, которыми можно управлять.

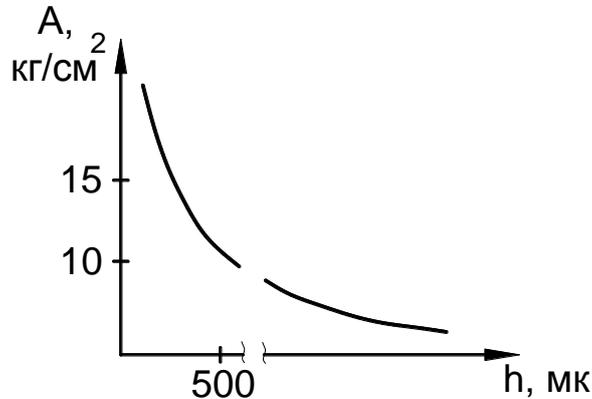


Рис. 5.3. Прочность на разрыв в зависимости от толщины слоя парафина между стальными поверхностями

### 5.3. Типы фрикционных связей

При относительном смещении реальных твердых тел согласно учению И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина и других в зоне трения можно ожидать реализацию пяти видов фрикционных связей (рис. 5.4).

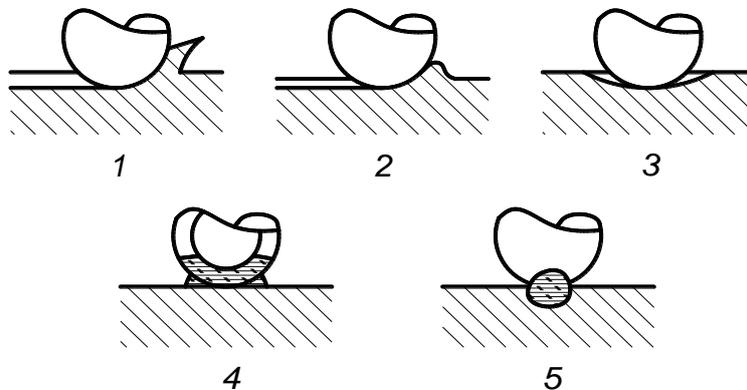


Рис. 5.4. Схематическое изображение пяти видов фрикционных связей взаимодействия поверхностей: 1 – микрорезание; 2 – пластическое оттеснение; 3 – упругое оттеснение; 4 – пластическая деформация и адгезионное взаимодействие; 5 – глубинное разрушение

При реализации первого вида связи в процессе внедрения неровностей осуществляется микрорезание. Условием прохождения этого процесса является  $h/r > 0,1$  для несмазанных поверхностей и  $0,2...0,3$  - для смазанных. Вторая фрикционная связь характеризует пластическое оттеснение, которое проявляется при малом значении сил адгезии, когда при данной степени пластической деформации еще не достигается схватывание. В этом случае  $h/r < 0,1$ .

Третья фрикционная связь относится к упругому оттеснению, т.е. на контактируемых поверхностях осуществляется взаимодействие в условиях упругой деформации. Тогда

$$\frac{h}{r} = 240 \cdot \left( \frac{\sigma_s}{E} \right)^2,$$

где  $\sigma_s$  - предел упругости;  $E$  - модуль упругости;  $h$  - высота неровности;  $r$  - радиус закругления шероховатости.

При четвертом виде связи происходит пластическая деформация и адгезионное взаимодействие в тонком поверхностном слое, когда  $d\tau/dh > 0$ . Четвертый вид фрикционной связи известен как *положительный градиент механических свойств*, когда вышележащие к площади контакта слои материала твердых тел менее прочны, чем нижележащие (более удаленные от поверхности трения слои). Если трущиеся поверхности подчиняются указанному правилу, наблюдается наименьшая повреждаемость узла трения (износ и трение в этом случае минимальны). Это правило положено в основу выбора многих материалов трущихся пар для обеспечения их высокой износостойкости.

В пятой фрикционной связи осуществляется глубинное разрушение поверхностей в результате схватывания, когда реализуется условие  $d\tau/dh < 0$ , т.е. отрицательный градиент механических свойств трущихся тел.

В реальном фрикционном узле могут одновременно реализовываться все пять видов фрикционного контакта. В ряде случаев может реализовываться и превалирующее действие того или иного вида фрикционного взаимодействия, по которому судят уже о механизме трения между телами в целом.

#### **5.4. Развитие усталостных трещин при трении**

Из большого многообразия микродефектов поверхности твердых тел (рис. 5.5) можно выделить наиболее характерные клиновидные трещины в виде плоской трещины (а), клинообразной трещины двойного заострения (б) и полуэллиптического сечения (в). Из них наиболее распространенными можно считать плоскую клинообразную трещину, имеющую некоторое закругление в ее устье с радиусом  $\rho$ . При приложении внешних сил к хрупким твердым телам мы сталкиваемся с фактором, когда вблизи устья трещины и в плоскости

ее сечения наблюдается резкое увеличение напряженного состояния материала  $\sigma_{\text{мол}}$ , в несколько раз превышающее среднее напряжение  $\sigma$ , приложенное к внешней поверхности тела (рис. 5.6).

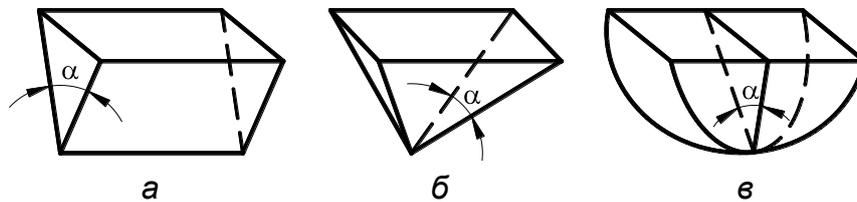


Рис. 5.5. Геометрические формы микротрещин

В тех случаях, когда энергия, приложенная внешними силами к материалу устья трещины, превышает энергию, необходимую для образования новой поверхности, происходит развитие трещины. Если этого превышения не происходит, трещина после некоторого своего увеличения в момент приложения внешней силы, после снятия нагрузки приходит в исходное состояние. В условиях же реальных тел, не обладающих абсолютной упругостью, может происходить и постепенное развитие трещины. Особенно это может проявляться при многоцикловых нагружениях твердых тел.

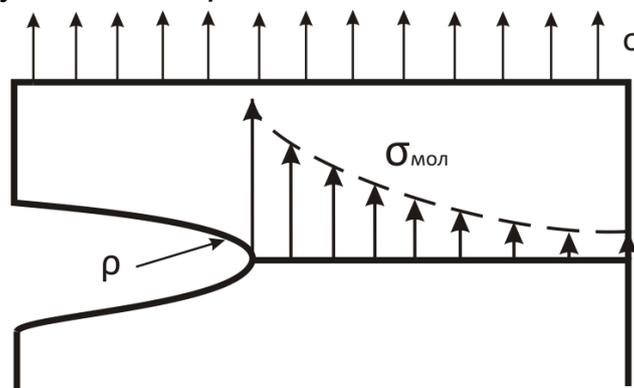


Рис. 5.6. Напряженное состояние материала вблизи устья микротрещины

Помимо развития внешних трещин в твердом теле могут развиваться и внутренние трещины (рис. 5.7), получившие название трещины Гриффитса по имени автора, теоретически исследовавшего механизмы их развития. Гриффитс установил, что напряжение  $P$ , при достижении которого трещина начинает быстро расти, связано с начальной длиной трещины  $C$ , поверхностной энергией  $\sigma$  и модулем упругости  $E$  материала

$$P = \sqrt{E \cdot \frac{\sigma}{C}}$$

Большое влияние на развитие трещины и на разрушение тел оказывает внешняя среда и прежде всего эффект Ребиндера.

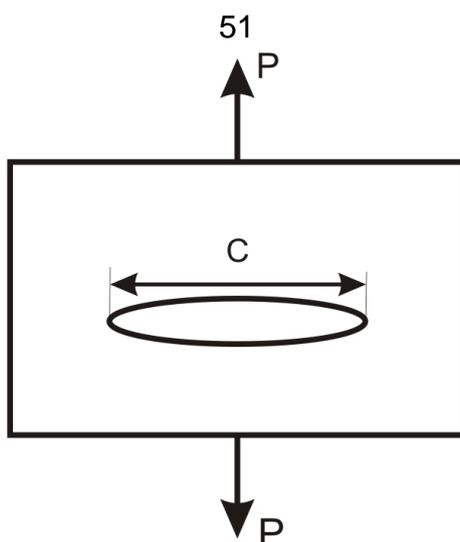


Рис. 5.7. Трещина Гриффитса

В условиях внешнего трения, под действием нормальных нагрузок и сил трения на материал трущихся тел воздействуют периодические усилия с достаточно высокой частотой воздействия. Подобные силы в сочетании с действующей достаточно активной средой (газовой и материала смазочных веществ) способствуют развитию усталостного механизма разрушения трущихся тел.

### 5.5. Работа сил трения. Температура на поверхностях трения

Под воздействием внешних сил при относительном смещении двух контактирующих тел в зоне их трения одновременно реализуется большое множество элементарных фрикционных связей с разными типами взаимодействия продолжительностью  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  с. Каждый выступ одного тела за время нахождения в зоне трения реальных тел испытывает многократное воздействие со стороны другого тела, деформируется, воспринимает эту энергию и тут же излучает и передает ее близлежащим телам.

В общем случае интегральную характеристику фрикционного взаимодействия - работу (энергию) трения между твердыми телами - можно представить в виде

$$A = E = F \cdot l = \mu \cdot N \cdot l,$$

где  $F$  - сила трения;  $l$  - путь трения, равный длине зоны трения;  $\mu$  - коэффициент трения;  $E$  - энергия.

А мощность, теряемую во фрикционном контакте, - в виде

$$W = \frac{A}{t} = \frac{\mu \cdot N \cdot l}{t} = \mu \cdot N \cdot V_{ск},$$

где  $t$  - время фрикционного контакта;  $V_{ск}$  - скорость скольжения.

Согласно 1-му закону термодинамики работа трения расходуется на образование новой поверхности  $\Delta S$  и на изменение внутренней энергии  $\Delta E$  системы, т.е.

$$A = \Delta S + \Delta E.$$

В большинстве случаев 95...99 % от затрачиваемой работы трения расходуется на изменение внутренней энергии трущихся тел. До 95% из них расходуется на нагрев непосредственно контактирующих поверхностей трения, а оставшаяся доля - на возбуждение низко- и высокочастотных колебаний выступов поверхности, являющихся источниками звуковых и электромагнитных волн, начиная от низких и до более высоких, приближающихся к легкому рентгеновскому излучению.

При деформировании, микрорезании, оттеснении и отделении частиц материала трущихся тел, а также при развитии внешних и внутренних трещин происходит увеличение поверхности твердых тел с присутствующей для нее некомпенсированной свободной поверхностной энергией. На это расходуется от 1 до 5 % от затраченной работы трения.

Энергия, генерируемая на выступах поверхности трущихся тел, во время свершения фрикционного взаимодействия в дальнейшем переносится как в окружающую среду, так и внутрь тел трущейся пары. При этом важное влияние на перераспределение потоков энергии и их абсолютную величину оказывают теплофизические характеристики среды, поверхности и самого материала трущегося тела, а также форма контактирующих тел и закономерности подвода энергии в зону трения.

Реальный контакт трущихся твердых тел (рис. 5.1) весьма неоднороден по напряженному состоянию материалов трущихся тел. Это обстоятельство является причиной и того, что выделяющаяся при трении энергия далеко неравномерно распределяется по объему контактирующих тел. Тепловая динамика трения твердых тел, опираясь на молекулярно-механическую теорию трения, теплофизические исследования и специальные эксперименты, выделяет объемную температуру тела  $\delta_v$ , среднюю температуру поверхности трения  $\delta_{cp}$  и температуру вспышки  $\delta_{всп}$ . Для ряда видов трения температура поверхности может быть в 2...3 раза выше объемной температуры трущихся тел, а температура вспышки еще на 100 градусов и более превышать температуру поверхности трения. В общем случае максимальная температура трения на фактическом пятне контакта может быть представлена в виде

$$\delta = \delta_v + \delta_{cp} + \delta_{всп}.$$

А это означает, что возникающие на реальном контакте трущихся тел температуры могут оказывать существенное влияние на состояние и свойства поверхностных слоев, а также и на свойства самих трущихся тел, вплоть до фазовых превращений, тем самым оказывая существенное влияние на трение и износ трущихся тел.

На основании изложенного выше наибольшее внимание при решении большинства триботехнических задач в настоящее время уделяется влиянию тепловой динамики трения на развитие фрикционных процессов, а также на трение и изнашивание узлов трения машин и оборудования.

### 5.6. Химическое модифицирование поверхности

Из учения о строении и свойствах твердого тела следует, что свободная поверхностная энергия во многом определяет механические характеристики (например, такие, как прочность, твердость, уровень трения и т.п.). Причем между ними существует прямо-пропорциональная зависимость. В силу этого на механические характеристики твердых тел могут оказывать заметное влияние как физические, так и химически адсорбированные вещества.

Тщательно проведенные исследования показали, что энергия взаимодействия между металлическими телами во фрикционном контакте определяется степенью их окисления (рис. 5.8).

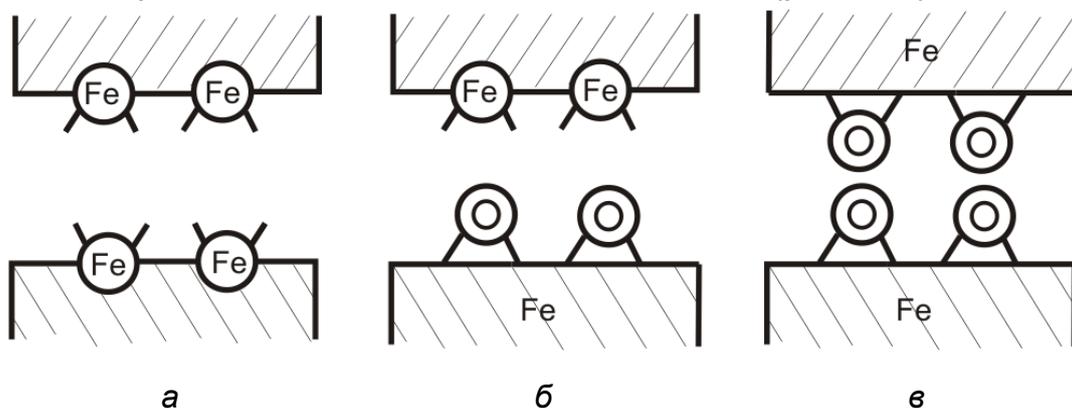


Рис. 5.8. Модели взаимодействия металлических тел во фрикционном контакте

Так, если при контакте в вакууме чисто металлических поверхностей *а*, например, железа, энергия взаимодействия равняется  $4 \cdot 10^{-6}$  Дж/мм<sup>2</sup>, то в случае контакта чистого металла с окисленной поверхностью *б* того же материала она равняется уже  $2 \cdot 10^{-6}$  Дж/мм<sup>2</sup>, а в случае двух окисленных металлов *в* – только  $0,2 \cdot 10^{-6}$  Дж/мм<sup>2</sup>.

Кроме того, у ряда металлов (свинец, медь и др.) коэффициенты трения окислов бывают значительно ниже самих чистых металлов. Для таких тел окисные пленки играют еще и роль защитных средств от холодного сваривания и когезионного вырывания металла при трении. В подобных случаях окисление металлов является фактором, обеспечивающим скольжение и уменьшающим трение и износ твердых тел. Здесь важную роль на работу пары трения оказывает состояние окружающей атмосферы и прежде всего содержание в ней кислорода и паров воды.

Аналогичное защитное покрытие твердых тел может происходить и в случае химического взаимодействия поверхности твердого тела с молекулами, находящимися в маслах и способными легко выделять атомы хлора, серы, мышьяка, фосфора и др. В процессе трения, в результате выделяющегося в контакте тепла, на наиболее нагруженных участках контакта могут образовываться легко деформируемые хлориды, сульфиды, арсениды, фосфориды и другие соединения, существенно снижающие как схватывание и износ, так и трение между телами. Образованию подобных защитных поверхностных покрытий могут способствовать электрохимические и механические процессы, происходящие на границе раздела твердое тело - внешняя среда.

### **5.7. Эффект П.А. Ребиндера**

Помимо действия химических процессов, оказывающих влияние на свойства поверхности и фрикционное взаимодействие между твердыми телами, существует открытое и исследованное П.А. Ребиндером аналогичное смазочное средство, обусловленное чисто молекулярным взаимодействием смазки с твердыми поверхностями, получившее название «эффекта Ребиндера».

Реальные твердые тела имеют как поверхностные, так и внутренние дефекты структуры. Как правило, подобные дефекты обладают избыточной свободной энергией. За счет физической адсорбции молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) происходит снижение уровня свободной поверхностной энергии твердого тела в местах их посадки. Это уменьшает работу выхода дислокаций на поверхность. Поверхностно-активные вещества проникают в трещины и в межкристаллитное пространство, оказывая механическое воздействие на их стенки и, раздвигая их, приводят к хрупкому растрескива-

нию материала и уменьшению прочности контактирующих тел. И если подобные процессы развиваются только на выступах контактирующих тел, уменьшая сопротивление сдвигу неровностей этого материала, то в целом этот процесс приводит к выглаживанию поверхности, уменьшению удельного давления в контактной зоне и в целом - уменьшению трения и износа трущихся тел. Но если нормальные нагрузки при трении значительно увеличиваются, высокие удельные давления распространяются на всю контурную площадь, разупрочнение материала осуществляется на большом участке поверхности и приводит уже к очень быстрому ее разрушению.

Эффект Ребиндера широко используется как при разработке смазочных материалов (для этого в смазочный материал вводят специальные ПАВ), так и для облегчения деформирования и обработки материала при изготовлении деталей машин (для этого используются специальные смазки и эмульсии в виде смазочно-охлаждающих жидкостей - СОЖ).

Проявление эффекта Ребиндера происходит на самых разнообразных материалах. Это и металлы, горные породы, стекла, элементы машин и оборудования. Среда, вызывающая понижение прочности, может быть газообразной и жидкой. Часто в качестве ПАВ могут выступать расплавленные металлы. Например, медь, выделившаяся при расплавлении подшипника скольжения, становится ПАВ для стали. Проникая в трещины и межкристаллическое пространство вагонных осей, этот процесс становится причиной хрупкого разрушения осей и причиной аварий на транспорте.

Не отдавая должного внимания природе процесса, мы часто стали сталкиваться с примерами, когда аммиак вызывает растрескивание латунных деталей, газообразные продукты сгорания резко ускоряют процесс разрушения турбинных лопаток, расплавленный хлористый магний действует разрушающе на высокопрочные нержавеющие стали и ряд других. Знания природы этих явлений открывает возможности направленно решать вопросы повышения износостойкости и разрушения ответственных деталей и узлов машин и оборудования, а при надлежащем использовании эффекта Ребиндера - повышать производительность обрабатывающего оборудования и эффективность использования пар трения, т.е. экономить энергию.

### 5.8. Угол смачивания поверхности твердого тела

В узлах трения на эффективность использования смазочных материалов и протекание ряда процессов на поверхностях трения оказывает большое влияние величина свободной поверхностной энергии взаимодействующих тел. Об уровне свободной поверхностной энергии твердых тел часто судят по конусу угла смачивания (или просто угла смачивания) их жидкостью. Для этого капля чаще всего очищенной воды осторожно помещается на интересующую нас поверхность, и по углу, проходящему через каплю между касательной к мениску капли в месте ее касания с твердой поверхностью и самой плоскостью поверхности, оценивают угол смачивания (рис. 5.9). Его величина зависит от значений удельной свободной поверхностной энергии (поверхностного натяжения  $\sigma$ ) трех соприкасающихся поверхностей раздела: твердого тела - жидкости  $\sigma_{ТЖ}$ , твердого тела - газа  $\sigma_{ТГ}$  и жидкости - газа  $\sigma_{ЖГ}$ . Поверхностные натяжения  $\sigma_{ТЖ}$  и  $\sigma_{ЖГ}$  препятствуют растеканию капли и действуют на  $\sigma_{ТГ}$ . В этом случае косинус угла смачивания определяется выражением вида

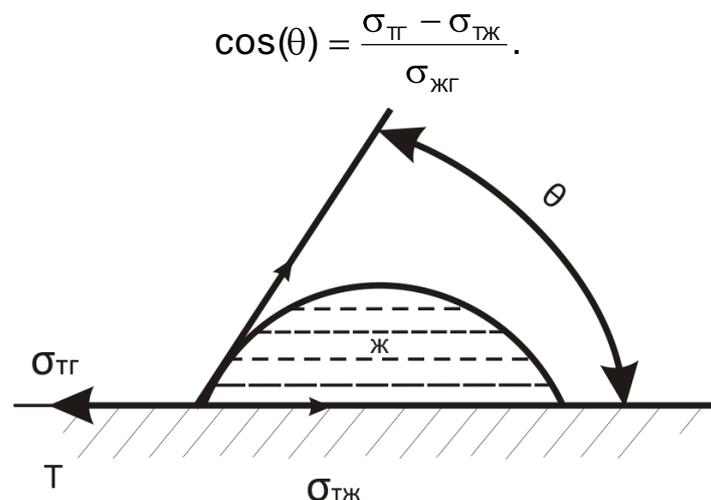


Рис. 5.9. Характер смачивания каплей жидкости поверхности твердого тела: Т - твердое тело; Ж - жидкость; Г - газовая среда

Для каждой чистой поверхности твердого тела характерна определенная величина угла смачивания. По величине этого угла все тела часто разделяются на гидрофильные (лучше смачиваемые водой) и гидрофобные. К гидрофильным относятся окислы, карбонаты, сульфаты, силикаты, стекло и ряд других тел. К гидрофобным - чистые металлы, графит, сульфиды неокисленных с поверхности металлов, высшие гомологи органических соединений, полимеры и др.

Смачивание тел жидкостью весьма чувствительно к малейшим загрязнениям, появляющимся на поверхностях твердых тел (например, органическим маслам и поверхностно-активным веществам). Ввиду простоты измерения и способности реагировать на малые изменения величины свободной поверхностной энергии тел, метод измерения угла смачивания часто используется для определения степени загрязненности твердых тел и оценки характера смачивания смазочными материалами поверхностей трения.

### 5.9. Особенности трения твердых тел

Воспользовавшись положениями молекулярно-механической теории трения И.В. Крагельского, которая в общем виде определяет это явление как сумму молекулярной составляющей

$$f_{\text{МОЛ}} = \frac{\tau_0}{P_r},$$

и деформационной составляющей

$$f_{\text{ДЕФ}} = \beta + k \cdot \alpha \sqrt{\frac{h}{R}}, \text{ т.е.}$$

$$f = f_{\text{МОЛ}} + f_{\text{ДЕФ}},$$

представляется возможность выявить вполне определенные зависимости изменения коэффициентов трения от ряда факторов, присутствующих трению твердых тел, свободных от специфических поверхностных загрязнений. Например, такие зависимости, как изменение сил статического трения для молекулярной и механической его составляющих (рис. 5.10, 5.11) и результирующей сил трения от давления на площади истинного контактирования (рис. 5.12).

Здесь обращает на себя внимание зависимость сил трения от нагрузки в области, где превалирует упругий контакт, силы молекулярного взаимодействия (до давления менее  $P_r$ ) и наличие области с повышенным влиянием деформационной составляющей силы трения (при давления свыше  $P_r$ ), когда увеличивается доля пластического деформирования материала.

Высота неровностей контактирующих деталей оказывает сложное влияние на коэффициент трения. Уменьшение высоты неровностей приводит к росту фактической площади касания и увеличению молекулярной составляющей силы трения (рис. 5.13). С увеличением высоты

выступов (при  $R_z > R'_z$ ) и, как следствие, уменьшением радиуса закругления их вершин происходит рост деформационной составляющей силы трения и последующее увеличение результирующей силы трения.

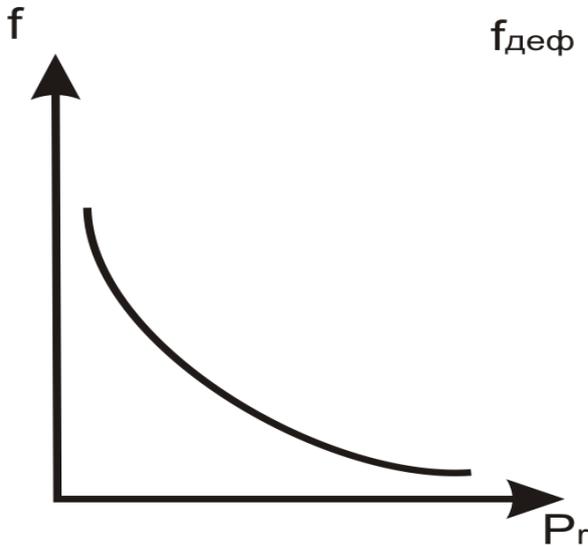


Рис. 5.10. Характер изменения молекулярной составляющей сил трения от давления на площади истинного контактирования

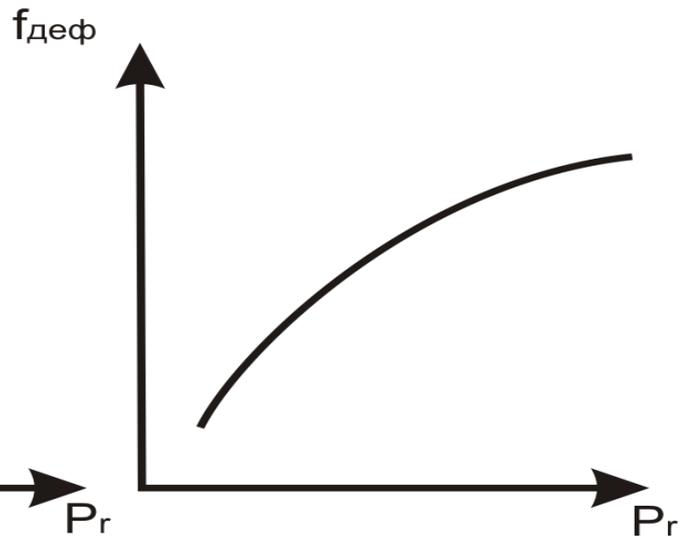


Рис. 5.11. Характер изменения деформационной составляющей сил трения от давления на площади истинного контактирования

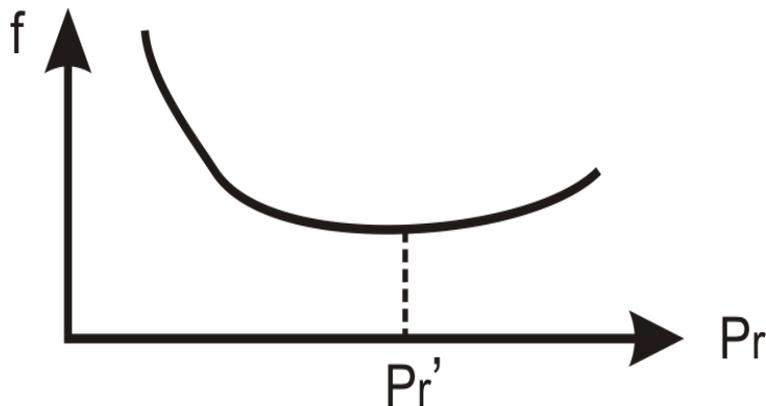


Рис. 5.12. Характер изменения силы трения от давления  $P_r$

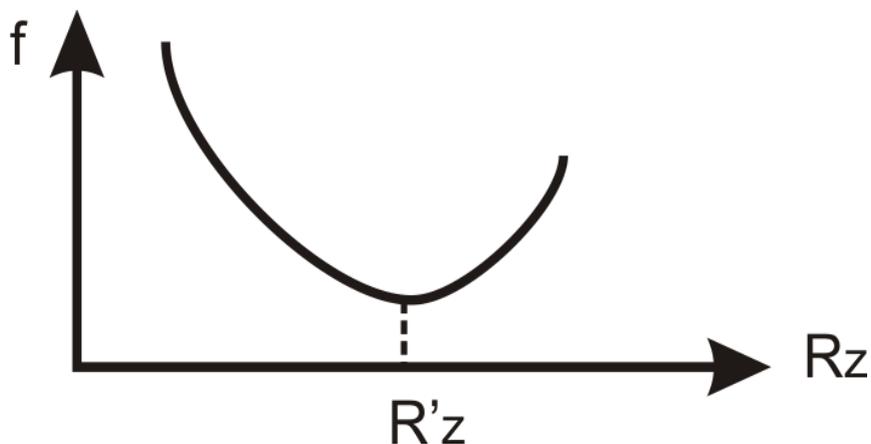


Рис. 5.13. Зависимость коэффициента трения от высоты неровностей на трущихся поверхностях

Большое влияние на уровень статического трения между телами имеет также продолжительность неподвижного контактирования трущихся тел (рис. 5.14).

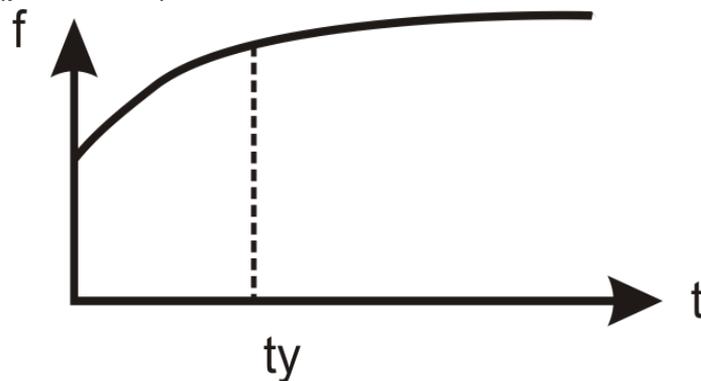


Рис. 5.14. Зависимость коэффициента статического трения от времени формирования контакта

Здесь обращает на себя внимание то, что время  $t_y$ , начиная с которого коэффициент трения не меняет своей величины, во многом зависит от способности материала релаксировать (распространять внутри себя) напряжения, создаваемые внешними силами. На величину  $t_y$  способна оказывать заметное влияние и температура в контактной зоне твердых тел. Для упругих тел  $t_y$  может измеряться долями секунды, а для находящихся в неупругом состоянии - составляет секунды, часы и еще большие промежутки времени (например, для некоторых полимерных материалов).

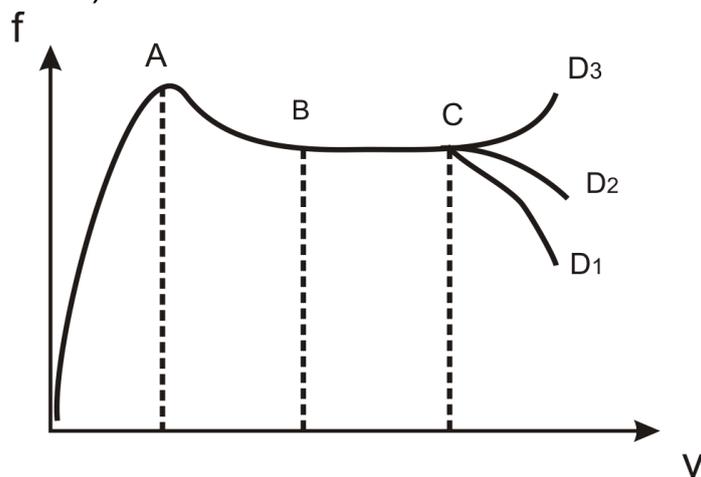


Рис. 5.15. Зависимость коэффициента трения от скорости относительного скольжения твердых тел

Важной является также и зависимость силы трения от скорости относительного движения (относительного смещения) твердых тел (рис. 5.15). Здесь можно выделить четыре области изменения скорости, принципиально отличные по условиям трения. В первой из них,

на участке до точки *A*, осуществляется процесс формирования фрикционного контакта за счет микродеформаций в зоне контакта, роста напряжений, движения дислокаций и ряда других факторов. Во второй области изменения скоростей за счет быстроты относительного смещения трущихся тел и их реологических свойств, время контактирования между неровностями поверхностей трения сокращается настолько, что полного формирования фрикционного контакта не происходит и трение между телами уменьшается.

В точке *B* и далее с увеличением скорости фрикционный контакт между твердыми телами находится в динамическом равновесии и продолжает оставаться несформированным. В третьей области скоростей, на участке *BC*, в условиях, когда устраняются продольные и поперечные колебания твердых тел, коэффициент трения не меняется по величине. Это обусловлено тем, что тепло, выделяющееся при трении, успевает рассеиваться между трущимися телами и в окружающее пространство и не вызывает существенного изменения механических свойств, фрикционных поверхностей. В четвертой области скоростей тепло, выделяющееся в зоне трения, уже не успевает рассеиваться в окружающую среду и приводит к перегреву материала, составляющего фрикционный контакт. Эксперименты показывают, что вспышки температуры во фрикционном контакте могут в ряде случаев достигать 600...1200°C. Это приводит к появлению большого количества дефектов в кристаллической решетке, уменьшению механических свойств материалов и вызывает снижение силы трения на участках  $CD_1$  и  $CD_2$ . В отдельных же случаях, как например, на участке  $CD_3$  некоторые полимеры с повышением температуры размягчаются, увеличивается площадь их истинного контактирования, в процесс трения вовлекаются все больше глубоко расположенных масс материала и трение их существенно увеличивается. Имеются и другие примеры, показывающие, что глубокое понимание природы фрикционного взаимодействия позволяет объяснить и фрикционные процессы, встречающиеся на практике и, на первый взгляд, трудно поддающиеся анализу.

#### **5.10. Влияние окисных, адсорбционных и других поверхностных пленок на трение твердых тел**

При трении твердых тел наблюдается большая зависимость трения от малейших изменений в их поверхностных слоях. Причиной этого

является наличие свободных ненасыщенных связей поверхностных атомов твердых тел, способных взаимодействовать с любыми атомами и молекулами, находящимися вблизи поверхностей трения. Следствием такого взаимодействия поверхностей трения с прилегающими к ним атомами других веществ является тот факт, что трение ювенильных поверхностей при обычных атмосферных условиях не осуществляется.

Экспериментами в тщательно контролируемых условиях было показано, что коэффициент трения на свежесколотых поверхностях каменной соли находится в прямой связи с продолжительностью пребывания образцов на воздухе. Было также установлено, что коэффициент трения в данном случае может быть уменьшен, если проводить эксперименты в предварительно очищенном от посторонних загрязнений воздухе (рис. 5.16).

Исследования Боудена, изучавшего влияние паров воды на величину трения свежеччищенных поверхностей железа, показали, что молекулы воды, попадая на поверхность металла, способны взаимодействовать с поверхностью трения, проявляя при этом как прочие химические связи, так и связи, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса. Появление следов воды на поверхности очищенного металла приводит к уменьшению коэффициента трения.

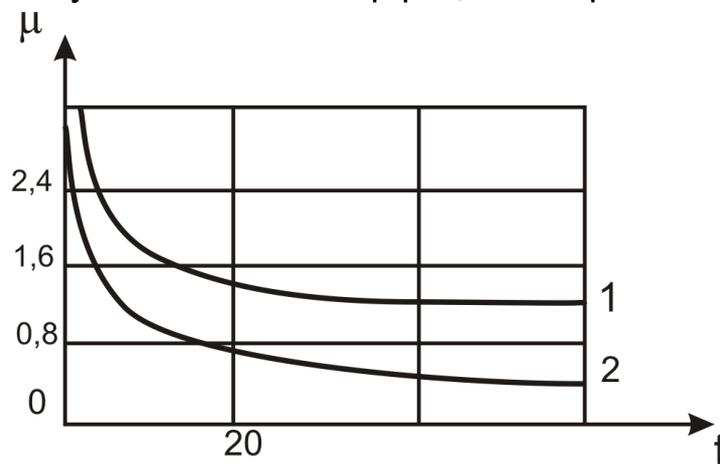


Рис. 5.16. Уровни трения на свежесколотой поверхности кристалла каменной соли в зависимости от продолжительности его пребывания на воздухе: 1 - в среде очищенного воздуха; 2 - в среде обычного воздуха

Вода, вступившая с поверхностью металла в химическую связь, давала необратимое снижение коэффициента трения до определенного уровня. Физически адсорбированная вода на таких поверхностях трения также приводила к снижению величины коэффициента трения, однако после ее удаления коэффициент трения тотчас же

поднимался до уровня, характерного для железа с хемосорбированной водой (рис. 5.17).

Было также установлено, что кислород, попавший на свежеочищенную поверхность металла, мгновенно образует на ней окисные пленки, приводящие к уменьшению величины коэффициента трения между металлическими телами (рис. 5.18). Наибольшее снижение величины коэффициента трения наблюдается при незначительных толщинах окисных пленок (рис. 5.19). Однако, по мере роста толщины окисной пленки, когда она уже начинает проявлять свои специфические структурные особенности, вновь наблюдается некоторое возрастание коэффициента трения (табл. 5.1).

Кемпбелом было показано (рис. 5.20), что на снижение трения между металлическими телами оказывает влияние состав оксидной пленки (сульфидная пленка или оксидная), а также и то, что металлические мыла, образованные на таких поверхностях в присутствии смазки, дают большее снижение коэффициента трения, чем смазка на неокисленных поверхностях трения (табл. 5.2).

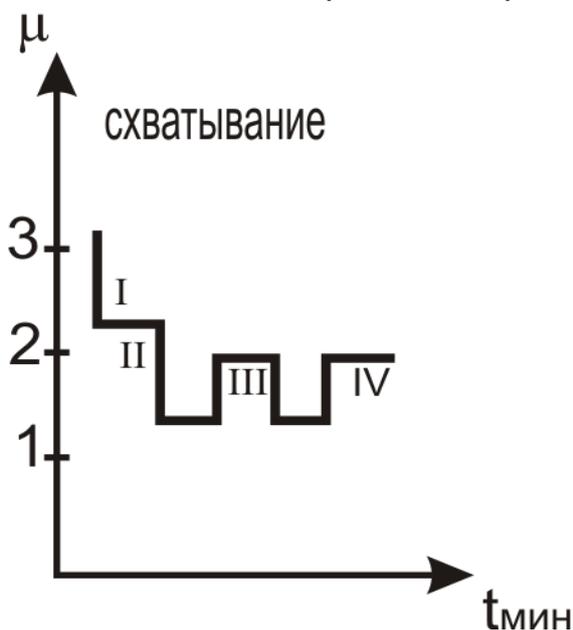


Рис. 5.17. Влияние паров воды на трение чистых поверхностей железа: 1 - выдержка в водяных парах в течение 10 с; 2 - выдержка 10 мин; 3 - вымораживание водяных паров; 4 - повторное вымораживание

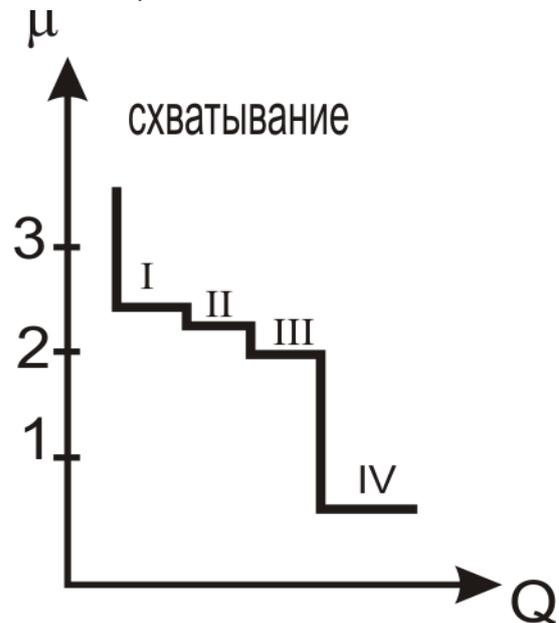


Рис. 5.18. Влияние количества кислорода на коэффициент трения предварительно очищенных поверхностей железа (опыты в условиях вакуума) при давлении кислорода: 1 - 10...4 мм рт. ст.; 2 - 10 мм рт. ст.; 3 - несколько мм рт. ст.; 4 - несколько мм рт. ст. через 15 ч

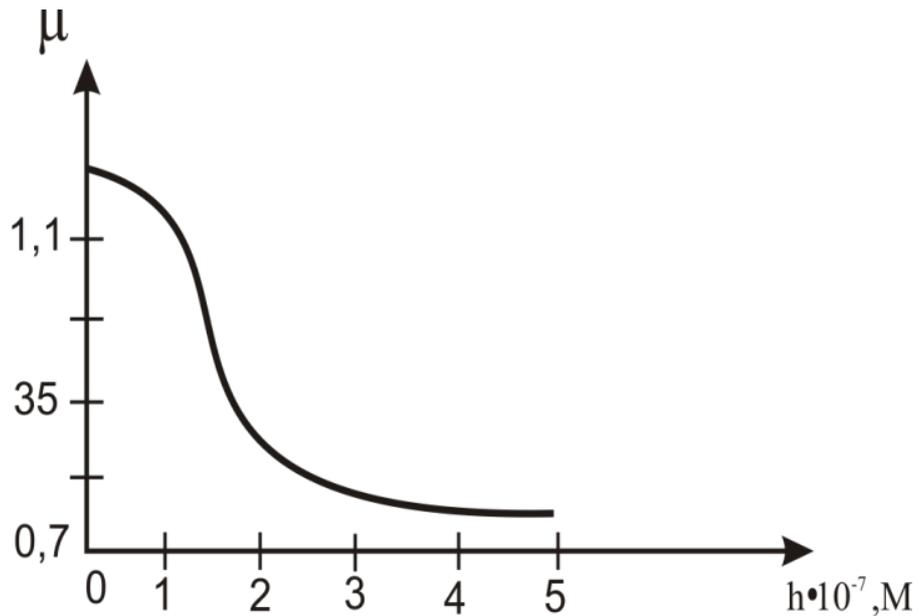


Рис. 5.19. Зависимость коэффициента трения от толщины окисной пленки на поверхности металла

Таблица 5.1

Зависимость трения от свойств оксидов металла

Оксид	Толщина пленки, мкм	Коэффициент трения
Диоксид меди	0,75	0,79
Диоксид меди	2,0	0,97
Оксид меди	7	0,90
Оксид меди	12	0,97

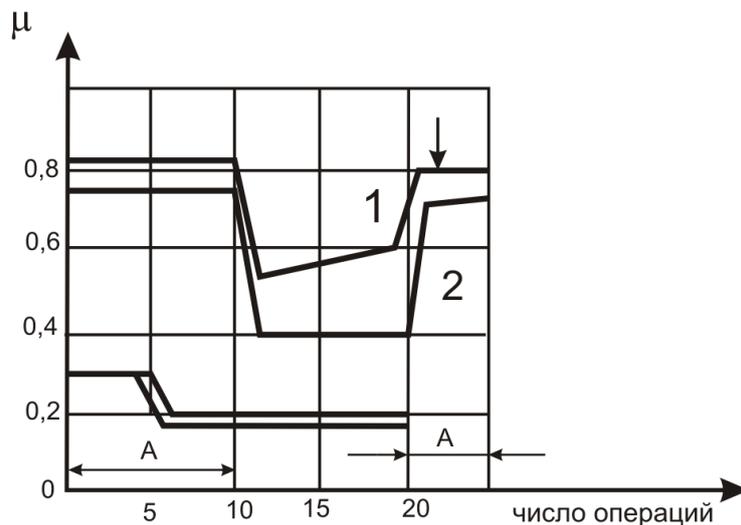


Рис. 5.20. Влияние оксидных пленок на коэффициент трения:  
 1 - латунь-латунь, сульфидная пленка; 2 - сталь-сталь, оксидная пленка;  
 3 - сталь-сталь, оксидная пленка со смазкой; 4 - сталь, сульфидная пленка со смазкой; А - те же материалы без оксидных пленок

Оксидные пленки обычно очень прочно удерживаются на поверхности металла и в атмосферных условиях обладают способно-

стью быстро восстанавливаться. Удалять оксидные пленки с металлических поверхностей удастся путем испарения или же посредством механического их истирания в условиях вакуума. После удаления оксидных пленок с поверхностей трения величина коэффициента трения на них вновь повышается до того уровня, который предшествовал появлению оксидных пленок на этих поверхностях (рис. 5.21).

Исследованиями Гарди было установлено, что на поверхностях трения стали и стекла при тщательной их очистке можно получать высокие и воспроизводимые величины коэффициентов трения. Было показано, что на снижение трения между телами существенное влияние могут оказывать и летучие органические вещества, попавшие на поверхности трения тел. Так, в опытах с каплей уксусной кислоты, помещенной вблизи трущихся тел, Гарди наблюдал снижение величины коэффициента трения между телами с 0,92 до 0,47.

Таблица 5.2

Влияние оксидных пленок на величину  
коэффициента трения твердых тел

Пара трущихся поверхностей	Тип пленки	Коэффициент трения	
		чистая поверхность	поверхность с пленкой
Сталь - сталь	Оксидная	0,78	0,27
	Сульфидная	0,78	0,39
Латунь - латунь	Сульфидная	0,88	0,57
Медь - медь	Сульфидная	1,21	0,74
	Оксидная	1,21	0,76
Сталь - сталь	Олеиновая кислота	0,78	0,11
Сталь - сталь	Смазка	0,78	0,32
Сталь - сталь	Оксидная и смазка	0,78	0,19

В.П. Лазаревым при исследовании вопроса о влиянии толщины смазочного слоя (стеарата кальция) на величину коэффициента трения между телами было показано, что решающую роль в снижении коэффициента трения между телами играет один монослой смазочного вещества. Дальнейшее же увеличение толщины смазочной прослойки до 61 монослоя стеарата кальция не оказывало влияния на величину коэффициента трения между исследуемыми телами (табл. 5.3).

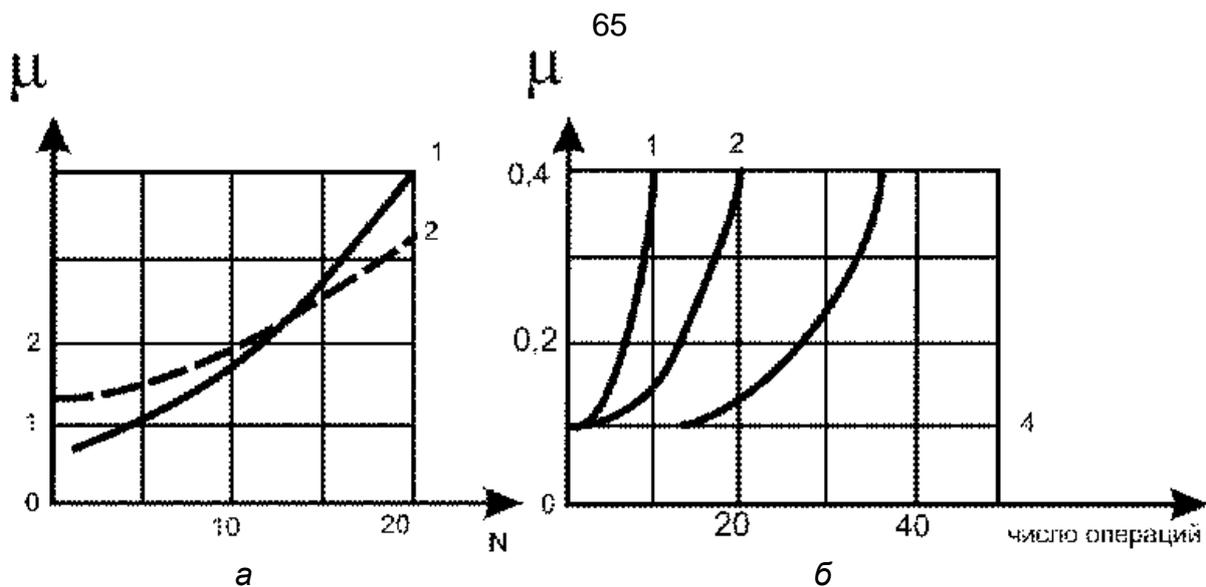


Рис. 5.21. Изменение коэффициента трения по мере изнашивания пленки на поверхности металла в зависимости от количества пробегов  $N$  по одному и тому же месту: а - 1 - оксидная пленка металла; 2 - в 200 раз более тонкая пленка стеариновой кислоты; б - на поверхности металла нанесены монослои стеариновой кислоты

Таблица 5.3

Зависимость величины коэффициента трения от силы прилипания и количества слоев стеарата кальция

Количество слоев	Коэффициент трения	Сила прилипания
1	0,34	805
3	0,34	617
21	0,34	377
31	0,34	377
61	0,34	377

Таким образом, можно заключить, что коэффициент трения между твердыми телами зависит от малейших загрязнений поверхностей трения и изменения свойств этих загрязнений.

В отличие от жидкостного трения, где смазочный эффект проявляется за счет внутреннего трения жидкости, разделяющей трущиеся тела, и от ее вязкости, при граничном трении основное значение приобретает уже не вязкость смазки, а ее химическая активность и способность к проявлению адсорбционного эффекта. В этом случае структура граничных слоев трущихся тел характеризуется как состоянием твердой поверхности, так и физико-химическими свойствами поверхностного слоя.

Впервые гипотеза об ориентации молекул органических веществ на поверхности раздела фаз была выдвинута Лангмюром и подтверждена

экспериментами Трийя, показавшими, что полимолекулярный адсорбционный слой состоит из ряда слоев, способных скользить один по другому, а в дальнейшем была развита Гарди. В основу этих представлений были положены силы Ван-дер-Ваальса. Рассматривая гомологические ряды парафинов, жирных кислот и спиртов, Гарди обнаружил, что статическое трение с увеличением молекулярного веса уменьшается.

Дальнейшее развитие теории о строении и свойствах граничных слоев жирных кислот смазки получило в работах А.С. Ахматова. Он рассматривал ориентированные на поверхностях твердых тел молекулярные слои органических веществ как моно- или поликристаллические тела, упругость которых возрастает с увеличением прилагаемого к ним давления. В этих условиях за счет зародышевой функции первичного слоя при толщинах пленок 0,05...1 мкм и менее скольжение между молекулярными слоями прекращается. Для объяснения свойств тонких слоев смазки Б.В. Дерягин ввел понятие маслянистости и эффекта расклинивающего действия тонких граничных пленок.

Жидкие пленки органических веществ, расположенные на поверхности твердого тела, испытывают воздействие его силового поля и адсорбционных слоев. Разработанная Б.В. Дерягиным теория «метода сдувания» как инструмента для исследования механических и термодинамических свойств граничных слоев жидкости, и тонкие измерения, выполненные им совместно с В.В. Карасевым, позволили обнаружить отличительные граничные свойства жидкости вблизи границы раздела твердой фазы. Было установлено, что исследуемые ими жидкости могут обладать вблизи поверхности твердого тела как повышенной вязкостью (например, в пленке сибациноамилового эфира), так и пониженной (фталиводибутилового эфира).

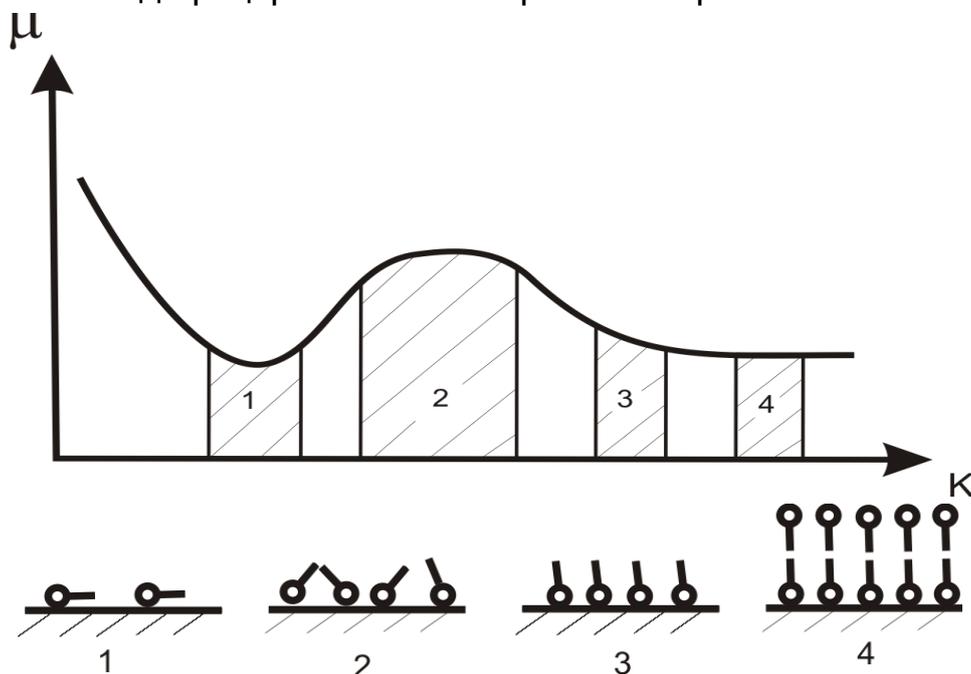
Г.И. Измайловой и Б.В. Дерягиным (рис. 5.22) было показано, что при адсорбции поверхностно-активных веществ на поверхности твердых тел меняется величина трения в зависимости от ориентации молекул в адсорбционном слое. При горизонтальной (по отношению к подложке) ориентации молекул наблюдается наименьшее трение. С возрастанием количества молекул поверхностно-активных веществ в адсорбционном слое (при изменении ориентации их молекул от горизонтальной к вертикальной) в случае наибольшей их неупорядоченности наблюдается наибольшее трение. При последующем увеличении количества молекул адсорбционный слой приобретает преимущественно вертикальную ори-

ентацию - трение уменьшается и с последующим увеличением количества молекул оно не меняется.

Г.И. Фукс, исследуя влияние поверхностно-активных присадок на смазочную способность масел, установил, что граничные свойства таких жидкостей проявляются уже при толщинах слоя 0,3...0,4 мкм. При больших толщинах слоя смазка ведет себя как обычная вязкая жидкость.

Боуден и Тейбор показали, что теория Гарди о влиянии на трение чисто физической адсорбции жирных кислот справедлива лишь для трения, осуществляемого при небольших давлениях и скоростях скольжения тел. При более тяжелых режимах трения (и температурах) происходят также и процессы хемосорбции с образованием на поверхностях трения металлических мыл.

Исследуя фрикционные свойства нефтяных масел, Г.В. Виноградов установил, что на смазочное действие масел очень важное влияние оказывают процессы, связанные с образованием в масле продуктов окисления, являющихся главными источниками питания поверхностей трения кислородом, необходимым для образования оксидных пленок. Важное значение на смазочное действие масел оказывают и процессы, связанные с модифицированием поверхностей трения металлов.

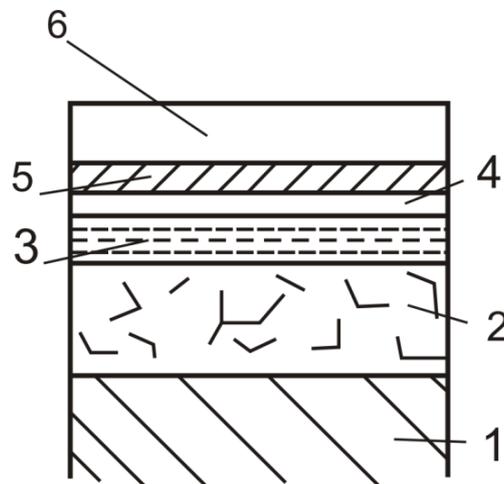


*Рис. 5.22. Зависимость коэффициента трения от концентрации и характера ориентации поверхностно-активных молекул смазки на поверхности трения*

Поверхности твердых тел, находящиеся в реальных условиях, почти всегда подвержены механическому, химическому и адсорбцион-

ному воздействию. Если предположить, что твердым телам не присуща неоднородность свойств поверхности и на них всегда имеются дефекты, то в таком идеализированном случае можно рассмотреть схему основных видов поверхностных слоев на металле, предложенную А.С. Ахматовым (рис. 5.23). На рис. 5.23 представлена первичная объемная структура металла 1. Ближе к поверхности находится зона деформированного металла 2, которая в зависимости от условий работы детали может меняться от единицы микрона до нескольких миллиметров (у железнодорожных колес и рельсов). Выше располагается слой окислов металлов 3, толщина которых может меняться от нескольких десятков ангстрем и выше. На них могут располагаться адсорбционные слои газов 4, воды 5 и полярных молекул смазки 6.

Относительно адсорбции молекул газа можно сказать, что для металла вообще характерно растворение газа в кристаллической решетке и адсорбция молекул газа на поверхности дефектов. Адсорбция воды всегда является характерной для тел, находящихся в атмосферных условиях. Адсорбция органических же веществ на твердых телах наблюдается только в условиях, когда эти вещества находятся в окружающей среде.



*Рис. 5.23. Схема основных видов адсорбционных, окисленных и наведенных трением слоев на поверхности металла*

Представленная схема расположения поверхностных слоев на поверхности металлов, учитывая свойства, присущие реальным телам, весьма приближенная. Кроме того, на распределение адсорбционных слоев на поверхности твердых тел во многом оказывает влияние предыстория событий, сорбционная активность адсорбата и латентный период, связанный с формированием слоя органических загрязнений.

Вода, попадающая на поверхность твердого тела (металла), способная сложным образом влиять на процессы, происходящие там, и, прежде всего, на характер протекания физической и химической адсорбции. Так, если в случае физической адсорбции слой воды, предварительно насыщающий адсорбционное поле поверхности тела, затормаживает адсорбцию поверхностно-активных молекул смазки, вследствие необходимости преждевременной ее десорбции, то в случае хемосорбции влияние воды на формирование смазочных слоев проявляется иначе. Чаще всего малые количества воды очень сильно влияют на скорость протекания реакции между молекулами жирной кислоты и окисленной поверхностью металла (в том числе и железа). Образующийся в результате поверхностный слой металлического мыла во многом способствует улучшению смазочной способности имеющейся там смазки. Это явление зависит от природы оксидной пленки на металле и различия оксидов одного и того же тела. В этих условиях вода благоприятствует формированию смазочного слоя. В случае же физической адсорбции воды на чистых поверхностях, по мнению Гарди, ее влияние на граничное трение не сказывается.

### **5.11. Обобщенные закономерности трения твердых тел**

Трение в узлах трения реальных машин и механизмов, подверженных атмосферному и производственному воздействию, имеет сложный характер. Однако, несмотря на это, анализ фрикционных процессов у большого количества машин и специально поставленные исследования позволяют выделить и вполне определенные закономерности. В условиях высоких контактных давлений влияние скорости скольжения на граничное трение сталей нельзя сводить, однако, только к тепловым эффектам. При различных скоростях скольжения меняется и характер взаимодействия трущихся тел со смазочными материалами и окружающей средой. При реализации граничного трения в контактной зоне происходят процессы разрушения поверхностных пленок и процессы «залечивания» образовавшихся ювенильных поверхностей новыми органическими пленками сорбционного происхождения. В зависимости от соотношения этих процессов, протекающих в контактной зоне, и реализуется тот или иной коэффициент трения. С уменьшением скорости относительного скольжения скорость химического взаимодействия твердого тела со смазочной или газовой среда-

ми оказывается выше скорости натирания поверхностных слоев. В области низких скоростей относительного скольжения особо важное значение приобретают реологические свойства контактирующих тел и их поверхностных слоев. Согласно современному учению о трении твердых тел важное влияние на реализацию силы трения оказывают как свойства поверхностных слоев трущихся тел, так и свойства смазочных веществ и адсорбционных пленок. Исследование строения, состава и свойств поверхностных слоев позволит подойти к выявлению причин значительных колебаний трения, наблюдающихся в эксплуатационных условиях (рис. 5.24).

Анализируя представленное, можно сформулировать требования для обеспечения удовлетворительной работы узлов трения машин и механизмов.

1. Тщательный учет реальных нагрузок на узел трения.
2. Подбор материала поверхностей трущихся тел.
3. Конструктивное выполнение узла трения.
4. Выбор соответствующего смазочного материала.

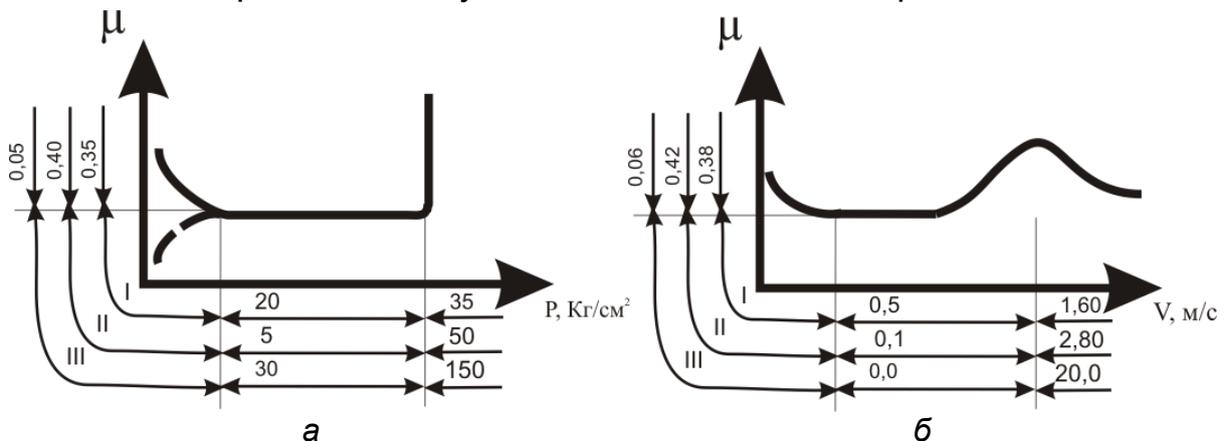


Рис. 5.24. Зависимости коэффициента трения от:  
а - нормального давления  $P$ ; б - скорости скольжения  $V$

Только сочетание специально подобранных выше указанных требований и параметров узлов трения может обеспечить их нормальную работу. Нарушение хотя бы одного из указанных требований (например, увеличение нагрузок на узел трения) может резко ухудшить условия работы узла трения. Для устранения случившегося требуется вновь осуществлять подбор тех или иных параметров для данного узла трения. Это может стать возможным или за счет изменения материала трущихся тел, изменения конструкции узла трения или выбора другого смазочного материала.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каковы особенности площадей контактирования твердых тел?
2. Каковы виды адгезионного взаимодействия твердых тел?
3. Каковы типы фрикционных связей?
4. Какова роль и виды трещин в развитии механических процессов при трении?
5. Что такое работа трения и ее составляющие?
6. Каковы температуры, реализуемые при трении твердых тел?
7. В чем сущность химического модифицирования и физического процесса (эффект П.А. Ребиндера и др.) при трении?
8. Каково влияние ориентации молекул смазки на уровень трения?
9. Каковы особенности поверхности слоев реальных трущихся тел?

## Глава 6. ИЗНАШИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

### 6.1. Общие понятия и определения

Процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и (или) остаточной деформации, получил название *изнашивание*. Результат же изнашивания, проявляющийся в виде отделения материала или в его остаточной деформации, получил название *износ*. Продуктами процесса изнашивания являются частицы износа, отделившиеся с трущихся поверхностей в виде полидисперсного материала и материала трущихся тел, пластически оттесненного из зоны трения. Обычно величину износа  $\Delta I$  определяют по толщине слоя  $\Delta h$ , объему  $\Delta V$  или массе материала  $\Delta M$ , вынесенного из зоны трения, которые связаны между собой соотношением

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A_a} = \frac{\Delta M}{\rho \cdot A_a},$$

где  $A_a$  - номинальная площадь поверхности трения;  $\rho$  - плотность изнашиваемого материала.

Наиболее распространенной характеристикой процесса изнашивания является *интенсивность изнашивания*, представляющая отношение износа  $\Delta I$  к пути  $\Delta S$ , на котором происходило изнашивание, или к объему работы  $\Delta A$ , при выполнении которой накоплен износ

$$I = \frac{\Delta I}{\Delta S} \quad \text{или} \quad I = \frac{\Delta I}{\Delta A}.$$

В том случае, когда  $\Delta S \rightarrow 0$  (или  $\Delta A \rightarrow 0$ ), говорят о *мгновенной интенсивности изнашивания*, и тогда величину  $I'$  рассматривают как первую производную износа по пути трения (или по работе), т.е.

$$I' = \frac{dI}{dS} \text{ или } I' = \frac{dI}{dA}.$$

Обычно процесс изнашивания характеризуют безразмерной величиной - *интенсивностью линейного изнашивания*  $I'_h$ , представляющей первую производную от толщины  $h$  изношенного слоя по пути  $S$

$$I'_h = \frac{\Delta h}{\Delta S} \text{ или } I'_h = \frac{dh}{dS}.$$

Аналогичным образом можно выразить объемную интенсивность изнашивания  $I'_V$  или интенсивность изнашивания по массе  $I'_m$ .

Энергетическая интенсивность линейного изнашивания выражается в виде

$$I'_{\text{эн}} = \frac{\Delta h}{W} = \frac{\Delta h}{\mu \cdot P_a \cdot A_a \cdot V \cdot t},$$

где  $\mu$  - коэффициент трения;  $A_a$  - номинальная площадь поверхности трения;  $P_a$  - давление в зоне трения;  $V$  - скорость относительного скольжения;  $t$  - продолжительность процесса трения.

Процесс изнашивания характеризуется также скоростью изнашивания  $V_n$ , представляющей собой отношение износа  $\Delta I$  к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое он наработан

$$V_n = \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Величина, обратная интенсивности изнашивания, получила название *износостойкости*. Она характеризует собой способность пары трения сопротивляться изнашиванию.

## 6.2. Классы износостойкости

Износостойкость в настоящее время стала одним из нормативных комплексных и наиболее универсальных показателей триботехнического узла трения. Значения износостойкости на практике колеблются в очень широких пределах: от  $10^3$  до  $10^{13}$ . Поэтому ее часто представляют в виде некоторой логарифмической шкалы. Весь диапазон шкалы износостойкости фрикционных пар разделяется на классы и разряды. Для их определения используется показательная или аналогичная логарифмическая зависимость

$$J = \alpha_k \cdot 10^k,$$

где  $\alpha_k$  - мантисса логарифма  $0 \leq \lg(\alpha_k) \leq 1$  ( $1 \leq \alpha_k \leq 10$ );  $k$  - целое число, обозначающее номер класса износостойкости.

Устанавливаются десять классов износостойкости - от 3-го до 12-го класса включительно. Нижняя граница  $J$  в каждом классе не входит в его состав (табл. 6.1, 6.2).

Таблица 6.1

## Классы износостойкости

Класс износостойкости	Износостойкость	Класс износостойкости	Износостойкость
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$

Таблица 6.2

## Класс износостойкости типовых узлов трения

Узел трения	Класс износостойкости
Цилиндропоршневая группа автомобиля	11, 12
Цилиндропоршневая группа компрессора	10
Направляющая токарного станка	9, 10
Дисковый тормоз	6...10
Подшипники скольжения	6...8
Резцы	8

Располагая конкретными данными об износостойкости того или иного узла трения, можно, используя представленные выше зависимости и таблицы, определить соответствующий ему класс износостойкости, а, следовательно, и триботехнические качества данного узла.

### 6.3. Входные и выходные параметры и внутренние факторы, определяющие износ

По характеру проявления и действия трение и износ представляют собой параметры, которые легко обнаружить и измерить. На первый взгляд, они представляют собой механический процесс. Однако более глубокое изучение процессов трения и износа показало, что в их основе лежат также и сложные физико-химические процессы, обусловленные молекулярными взаимодействиями.

И если износ реализуется лишь только при непосредственном взаимодействии трущихся тел, то силы трения реализуются как при непосредственном их контактировании, так и в случае, когда трущиеся тела разделены третьим жидким или газообразным телом.

Таблица 6.3

Блок-схема процессов и параметров трения и износа

Входные параметры	Внутренние факторы	Выходные параметры
1. Природа контактирующих тел 2. Промежуточная среда 3. Нагрузка 4. Скорость 5. Температура	1. Изменение шероховатости 2. Пластическая деформация поверхностного слоя 3. Накопление вакансий и дислокаций 4. Изменение структуры поверхностного слоя 5. Изменение механических свойств 6. Тепловыделение при трении 7. Изменение свойств пленок 8. Химическое взаимодействие зоны трения с окружающей средой 9. Трибомутиация	1. Сила трения 2. Интенсивность износа

Во всех случаях износ и его производные зависят от:

1) силовых и кинематических параметров и, в первую очередь, от давления на поверхности трения  $P_a$  и скорости относительного скольжения  $V_{ск}$ ;

2) параметров, характеризующих состав, структуру и механические свойства материалов пары трения (твердость, предел текучести, модуль упругости и др.);

3) свойств поверхностного слоя, его шероховатости, состава, жесткости, напряженного состояния и т.д.;

4) вида трения и свойств смазки;

5) внешних условий, влияющих на процесс изнашивания (температуры, наложения вибраций, влажности и др.);

6) конструктивных особенностей фрикционного узла.

Все эти параметры могут меняться во времени, т.е. в процессе работы узла трения. Поэтому точная констатация этих параметров представляет собой исключительно сложную задачу, решение которой в настоящее время находится еще в стадии становления. В связи с этим И.В. Крагельский предложил рассматривать фрикционный процесс как систему входных параметров, которыми мы можем задаваться; внутренних факторов, проявляющихся при непосредственном взаимодейст-

вии трущихся тел, что весьма сложно контролировать во время реализации фрикционного процесса, и выходных параметров, фиксируемых в результате происшедшего фрикционного контакта (табл. 6.3).

При кажущейся общности между процессами трения и износа каждое из этих явлений имеет свою специфическую природу. Более сложную природу взаимодействия проявляет механизм изнашивания твердых тел. С этим бывает связан и тот факт, что изменения уровня трения не всегда приводят к аналогичным изменениям результатов изнашивания.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Что такое изнашивание и износ, и каковы способы их обозначения?
2. Какие существуют классы износостойкости?
3. В чем сущность входных, внутренних и выходных параметров фрикционного процесса?
4. Какие факторы оказывают влияние на механизмы и результаты изнашивания?

## **Глава 7. МЕХАНИЗМЫ И ОСОБЕННОСТИ ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ**

Фрикционный контакт узла трения любой машины имеет неоднородность распределения сжимающих и растягивающих усилий, разные скорости относительного скольжения и контакт с окружающей средой (газами, дымами, парами, смазочными материалами и т.п.). Под действием сил выделяется тепло, образуются области с высокими градиентами температур и напряжений, материал деформируется, осуществляется движение дефектов и дислокаций, создаются благоприятные условия для протекания физических и химических процессов (электризация, диффузные, окислительные, восстановительные и сорбционные процессы), а также связанных с ними явлений. В реальном фрикционном контакте, как правило, одновременно протекают все эти процессы. Однако среди них для конкретных условий можно выделить наиболее характерный процесс, а в связи с этим охарактеризовать характерный для него механизм разрушения и вид изнашивания (рис. 7.1).

Принято различать следующие механизмы разрушения:

- 1) механический, в основе которого рассматривается действие только механических сил;
- 2) молекулярно-механический, в основе которого действуют силы физической природы;

3) коррозионно-механический, в основе которого действуют силы химической и электрохимической природы.

Каждому из этих механизмов соответствуют и характерные для них виды изнашивания. Поэтому в зависимости от механизмов разрушения различают износ деталей машин на виды изнашивания.

### 7.1. Механические виды изнашивания

*Абразивное изнашивание* реализуется в условиях, когда в зону трения тел попадают (или образуются там) твердые частицы. Они могут разрушать как более мягкое тело, а также шаржируясь в нем, осуществлять разрушение и другого более твердого трущегося тела. Для абразивного изнашивания характерным является наличие дискретного контакта с очень высокой степенью концентрации напряжения в месте контакта частица - трущееся тело.

Принято считать, что когда отношение глубины внедрения  $h$  частицы абразива в трущееся тело к ее радиусу закругления  $R$  бывает меньше выражения

$$\frac{h}{R} < \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_T} \right),$$

где  $\tau$  - касательное напряжение деформируемого материала;  $\sigma_T$  - предел текучести,

то частица перекачивается по поверхности трения и результатом ее воздействия является пластическое передоформирование поверхностного слоя. Такой вид разрушения твердой поверхности осуществляется, например, при полировке. В том же случае, когда это равенство не выполняется, частица абразива осуществляет микрорезание трущегося тела. В реальных условиях частицы абразива, попадающие в зону трения твердых тел, являются полидисперсными, по-разному ориентированными и имеют разное углубление в поверхности трения твердых тел, а поэтому и воздействие абразива на степень изнашивания твердых тел представляет собой сложную картину. Характерным при этом является то, что такая комплексная характеристика, как относительная износостойкость материалов (представляющая собой отношение некоторого эталонного материала к испытуемым), при абразивном изнашивании бывает линейно связанной с твердостью материалов (рис. 7.2).

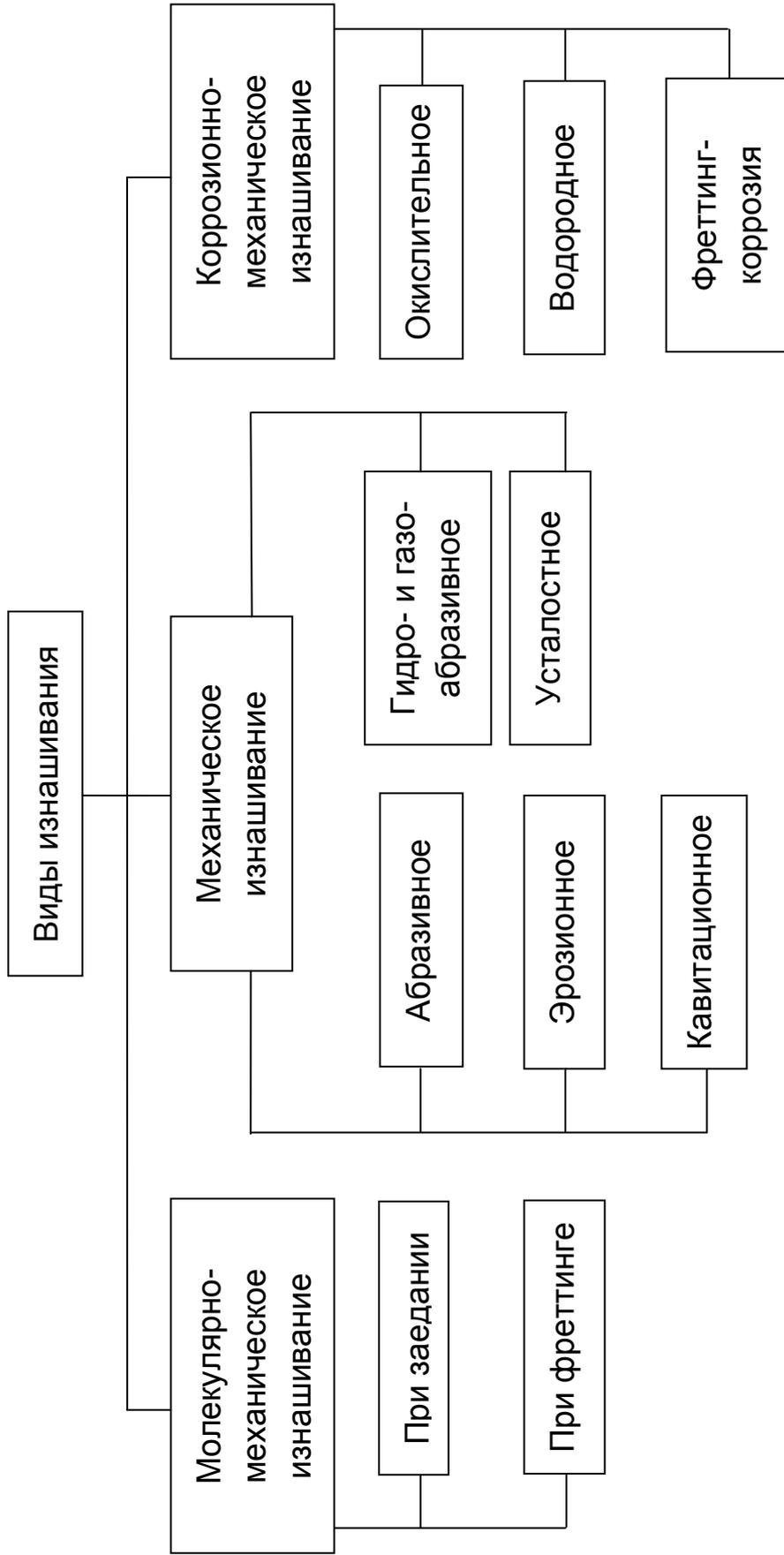


Рис. 7.1. Виды и механизмы изнашивания твердых тел

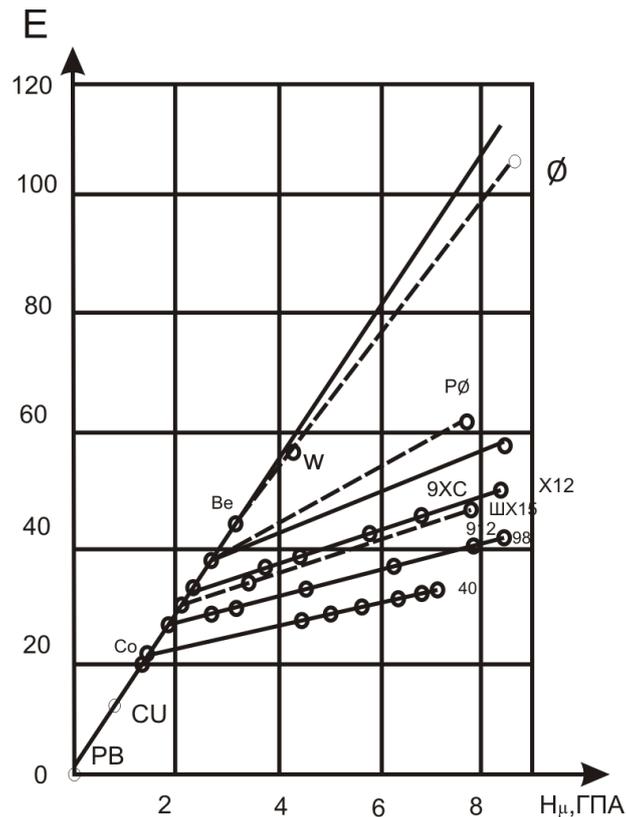


Рис. 7.2. Зависимость относительной износостойкости при трении об абразивную поверхность от микротвердости технически чистых металлов и сталей в термически обработанном состоянии

*Эрозионное изнашивание* - связано с воздействием на твердые тела потоков жидкости или газа, не засоренных абразивом. Локальные потоки жидкости и газа бывают способными пластические и другие виды воздействия на твердые тела, а также их разрушение.

*Газоабразивное изнашивание* - представляет собой комплексное воздействие на твердое тело газовой струи и абразивных частиц. Гидроабразивное изнашивание реализуется при воздействии на твердое тело потока жидкости и абразива.

*Кавитационное изнашивание* - возникает в потоке жидкости, быстро движущейся с переменной скоростью, например, при обтекании препятствий, когда возникают разрывы сплошности жидкости с образованием каверн, заполненных паром. Затем каверны захлопываются и, если это происходит у поверхности детали, жидкость с очень большой скоростью ударяется о стенку. При многократном повторении этих процессов происходит разрушение поверхности твердых тел. Примерами этого вида изнашивания являются повреждения лопаток гидравлических турбин и насосов, подшипников скольжения, внешней поверхности цилиндров водяного охлаждения двигателей внутреннего сгорания и др.

*Усталостное изнашивание* возникает в результате многочисленного и упругого оттеснения материала. Этот процесс имеет скрытый латентный период, вследствие которого происходит накопление повреждений внутри металла. Поскольку твердые тела, в том числе и металлы, неоднородны, трещины возникают на несовершенствах структуры кристалла. При этом бывает некоторый инкубационный период развития субмикроскопических трещин до уровня микротрещин, период развития микротрещин до уровня макротрещин, а затем - период развития макротрещин. И.В. Крагельский предложил оценивать этот вид износа в виде уравнения

$$l = k \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h \cdot P_a \cdot 1}{R \cdot P_r \cdot n}},$$

где  $k$  - множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях (обычно близок к 0,2);  $P_a$  - давление на номинальной площади  $A_a$ ;  $P_r$  - давление на фактической площади  $A_r$ ;  $h$  - глубина внедрения;  $R$  - радиус единичной неровности;  $n$  - число циклов, приводящих к разрушению деформируемого объема;  $\alpha$  - коэффициент перекрытия

$$\alpha = \frac{A_a}{A_r}.$$

## 7.2. Молекулярно-механические виды изнашивания

*Изнашивание при заедании* характеризуется результатом молекулярного взаимодействия между выступами твердых тел в зоне фрикционного контакта. В тех случаях, когда свободная поверхностная энергия контактирующих тел очень велика и образуется прочная адгезионная связь, превышающая когезионные силы, под действием внешних сил, создающих тангенциальные напряжения, происходит схватывание и значительный вырыв материала из менее прочного тела фрикционной пары. Согласно утверждению И.В. Крагельского этот вид разрушения реализуется в условиях, когда в зоне трения наблюдается отрицательный градиент сдвиговых напряжений, т.е.

$$\frac{d\tau}{dy} < 0,$$

где  $\tau$  - сдвиговая прочность;  $y$  - координата по нормали к поверхности, направленной вглубь материала.

В тех же случаях, когда при трении в контактирующих телах образуется положительный градиент напряжений, т.е.

$$\frac{d\tau}{dy} > 0,$$

сдвиговая прочность в более глубоких слоях оказывается больше по сравнению со сдвиговой прочностью в слоях, расположенных ближе к поверхности трущихся тел. Важным условием реализации изнашивания при заедании является чистота рабочих поверхностей трущихся тел от пленок загрязнений, адсорбционных, окисных и дисперсных слоев, препятствующих сближению поверхностей на расстояние действия поверхностных сил.

*Изнашивание при фреттинге* - механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микроперемещении. В отличие от фреттинг-коррозии окислительные процессы не играют здесь ведущей роли. В этом случае основную роль играют усталостные и адгезионные процессы.

*Водородное изнашивание* - это процесс разрушения металла рабочих элементов пары трения вследствие поглощения металлом водорода. Водород выделяется при трении как результат разложения водородсодержащих материалов (например, из пластмасс, из которых изготовлены ответные трущиеся тела; окружающей среды, смазочных материалов, воды, топлива и т.д.). Выделяющийся водород адсорбируется на поверхностях трения, затем диффундирует в деформируемый слой стали. Скорость диффузии определяется градиентом температур и напряжений и, поскольку водород в сталях и чугунах концентрируется в наиболее нагретых местах, он скапливается в поверхностном и подповерхностном слоях металла, так как эти слои наиболее разогреты и деформируемы, а также попадает в пространственные дефекты металла. Водород, концентрируясь в этих слоях, вызывает их охрупчивание. Водород также может проникнуть в металлы в процессе технологической обработки, что может быть предотвращено специальными приемами удаления технологического водорода.

Для водородного изнашивания характерен особый вид разрушения поверхностей трения - мгновенное образование мелкодисперсного порошка металла. Причиной этого являются одновременное развитие зародышей трещин по всей глубине деформированной зоны и эффект накопления водорода в трещинах, что приводит при дефор-

мациях, уменьшающих объем этих трещин, к развитию в них высоких давлений и вследствие этого расклинивающего действия - микротрещины сливаются, и происходит разрушение поверхностных слоев. При этом хрупкое разрушение поверхностных слоев закаленных или слаболегированных сталей наблюдается даже при ничтожно малом количестве поглощенного водорода.

Одна из разновидностей водородного изнашивания - так называемое «водородное изнашивание разрушением» - проявляется в намазывании стали и чугуна на ответные, более мягкие материалы, из которых изготовлены трущиеся детали. Так, в керосиновых насосах стальные закаленные роторы изнашиваются на глубину до 0,03 мм, и изношенный материал намазывается на поверхность бронзового золотника, в тормозных устройствах чугун с диска намазывается на ответную пластмассовую колодку, сталь с поверхности коленчатого вала переносится на мягкий баббитовый подшипник.

Борьба с водородным изнашиванием проводится в направлении уменьшения наводороживания при трении. Проникновение в сталь водорода можно ограничить, легируя ее хромом, титаном и ванадием. В смазочные материалы вводят специальные присадки, уменьшающие возможность наводороживания. Такой эффект обеспечивает введение в масло дибензилсульфоксида, который при сильно отрицательных потенциалах катодов восстанавливается до дибензилдисульфида и адсорбируется на поверхностях трения. Органические соединения, содержащие хлор, также вызывают связывание водорода в безвредные химические соединения. Другим путем затруднения проникновения водорода в поверхностные слои металла является создание положительного электрического потенциала по отношению к наводороживаемой детали. Снижение температур во фрикционном контакте до 50...60°C также защищает металл от проникновения водорода.

Впервые водородное изнашивание было описано, а также были найдены пути борьбы с ним в трудах отечественных ученых Д.Н. Гаркунова и А.А. Полякова.

### **7.3. Коррозионно-механические виды изнашивания**

*Окислительное изнашивание.* Металлическое состояние металлов термодинамически является неустойчивым, и поэтому металлы постепенно переходят в более устойчивую аморфную (ионную)

форму. Этот процесс получил широко распространенное название *коррозия*. Самопроизвольное разрушение металлических материалов происходит вследствие их физико-химического взаимодействия с окружающей средой (жидкой, газовой и твердой).

По механизму окисления принято различать, прежде всего, два его типа: химический и электрохимический.

*Химический тип* характеризуется взаимодействием металла в твердом состоянии с адсорбированными на нем молекулами газа (например, кислорода). При наличии сродства между металлом и газом происходит химическое взаимодействие. При этом окислитель отнимает у металла валентные электроны и на поверхности металла образуется новый материал с присущими ему свойствами (рис. 7.3). В газовой среде этот процесс происходит за доли секунды. В жидкой - гораздо медленнее.

*Электрохимический тип* окисления обуславливается переносом в электропроводящей среде ионов металла под действием электрического поля (это могут быть как внешние источники тока, так и контактная разность потенциалов). Основой для электропроводящей среды могут стать как адсорбированная на поверхности влага, так и влага в капельном состоянии. Окружающая нас среда (воздух) почти всегда несет в себе мельчайшие твердые частицы, в том числе и соли. Вместе с влагой они образуют необходимый для протекания этого процесса электролит. В тех случаях, когда на поверхности металла образуется оксидный материал с плотностью, близкой к металлу, оксидный слой бывает сплошным и диффузия молекул кислорода через него существенно затрудняется. Поэтому скорость роста толщины оксидного слоя на таких металлах быстро замедляется и на поверхности металла образуются тонкие и прозрачные пленки оксида. Этот механизм окисления характерен для инертных металлов (золота, платины и серебра). Оксидные пленки на черных и цветных металлах часто отличаются по плотности от основного металла. Благодаря этому оксидные пленки, образующиеся на металле, имеют разрывы или пучности, внутрь которых попадает кислород, и процесс окисления металлов продолжается. Для металла таких типов характерными являются более толстые слои оксидов, которые в процессе трения могут легко разрушаться и образовывать мелкие частицы износа абразива.

Окислительные процессы на металлах могут играть важную роль и в ускорении химических изменений смазки, которые часто при-

водят к образованию пленки полимеризованного материала на самих металлических поверхностях. Такие пленки могут быть вредными, вызывая, например, пригорание поршневых колец в двигателе внутреннего сгорания. Однако полимеризационная пленка может служить и защитным слоем при абразивном износе.

При сухом трении обычно образуются более толстые и насыщенные пленки оксидов, близких по составу и свойствам к известным оксидам металла. Так, в зависимости от условий трения и, прежде всего, от температуры на железе образуются пленки, содержащие  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ . Следует иметь в виду, что поскольку окисление поверхностей активируется их пластическим деформированием при трении, увеличение твердости рабочих элементов трущихся тел препятствует окислительному изнашиванию.

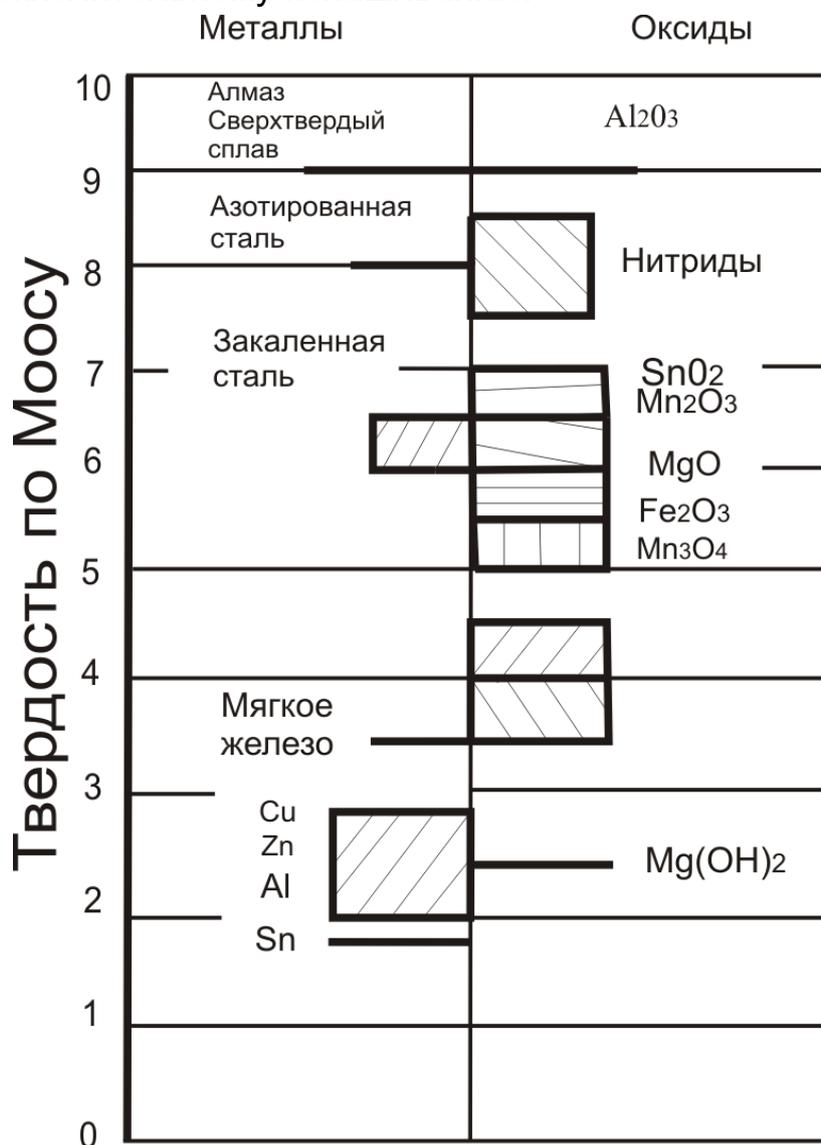


Рис. 7.3. Твердость металлов и оксидов по шкале Мооса

*Фреттинг-коррозия* - это изнашивание плотно контактирующих тел при их колебательном относительном перемещении в условиях воздействия коррозионной среды. Изнашивание при фреттинг-коррозии происходит при малых колебательных перемещениях. Это особая форма изнашивания, по условиям возникновения и характеру проявления заметно отличающаяся от обычного коррозионно-механического изнашивания при однонаправленном движении. Вследствие малой амплитуды колебаний продукты износа полностью не удаляются из зоны трения и оказывают определенное абразивное воздействие на основной металл, что может привести к заклиниванию сопряжений. При этом повреждения локализуются на участках действительного контакта. Эти повреждения имеют вид натиров, налипаний металла, вырывов или раковин, часто заполненных продуктами коррозии со специфической окраской и имеющих вид окрашенных пятен, участков локального износа в виде полос или канавок, а также поверхностных микротрещин. Специфический характер изнашивания при фреттинг-коррозии проявляется также в том, что окислительная среда интенсифицирует процесс изнашивания, окисление при этом протекает интенсивно и продукты изнашивания в основном представляют собой диспергированные оксиды трущихся металлов. Такой характер окислительного процесса, при котором интенсивное окисление не приводит, однако, к образованию защитных пленок Б.И. Костецкий связывает с динамическим характером нагружения узла трения и называет динамическим окислением.

Фреттинг-коррозия приводит к значительному ухудшению качества поверхностей и в 3...6 раз снижает усталостную прочность деталей вследствие образования концентраторов напряжений, а также снижает размерную точность сопряжений.

Фреттинг-коррозия обычно развивается при прессовых посадках на вращающихся валах в местах посадки лопаток турбин, в шпоночных, шлицевых, болтовых и заклепочных соединениях, подверженных вибрации, подшипниках качения, передающих нагрузку в условиях отсутствия качения и т.д., т.е. в тех случаях, когда имеют место микроколебания и окислительная среда. Согласно исследованиям Р.Б. Уотерхауза для развития фреттинг-коррозии достаточно, чтобы амплитуда колебаний достигала долей микрометров. Увеличение амплитуды приводит к росту объемного изнашивания. При достижении амплитуды 2...5 мм и более изнашивание приобретает характер обычного окислительного при одно-

направленном скольжении. Зависимость износа от удельной нагрузки имеет экстремальный характер. Левая ветвь зависимости отражает обычные для фреттинг-коррозии коррозионно-усталостные процессы, когда поступление кислорода воздуха в контакт не затруднен. В правой части кривой износ снижается, поскольку характер изнашивания меняется, в частности, интенсифицируются адгезионные процессы, в этих условиях не приводящие к значительному износу. Увеличение частоты колебаний снижает износ при фреттинг-коррозии до определенной установившейся величины, после чего износ стабилизируется. В атмосфере азота износ от частоты колебаний не зависит.

Защита от фреттинг-коррозии - применение коррозионно-стойких материалов в узлах трения, подвергаемых этому виду изнашивания, введение в них смазочных материалов, прежде всего пластичных. Весьма эффективно при этом использование смазок или покрытий, содержащих графит или дисульфид молибдена, а также коррозионно-стойких покрытий, например из фторопласта. К конструктивным путям борьбы с фреттинг-коррозией относится стремление уменьшить колебательное перемещение сопряженных поверхностей путем увеличения натяга для случая прессовых посадок, использования демпфирующих устройств для уменьшения вибраций и т.д.

#### **7.4. Переход одних видов изнашивания в другие**

При анализе процесса изнашивания трущихся тел, прежде всего, необходимо выделить ведущий вид изнашивания. Однако с уверенностью основной вид изнашивания можно установить лишь для стационарно нагруженных узлов трения. В случае, если условия изнашивания изменяются, то при монотонном изменении удельной нагрузки на узел трения или скорости относительного перемещения элементов этого узла трения в определенных критических точках наблюдается скачкообразное изменение интенсивности изнашивания (рис. 7.4). Это объясняется переходом к другому виду изнашивания. Впервые такой эффект в 1936 г. был обнаружен Келем и Зибелем. При достижении некоторого критического значения скорости относительного перемещения трущихся тел наблюдалось снижение интенсивности изнашивания в 500...600 раз. Позднее наличие критических точек на зависимостях интенсивности изнашивания было установлено К. Дисом в 1943 г., а сами точки тщательно исследованы Б.И. Костецким и его школой (рис. 7.5).

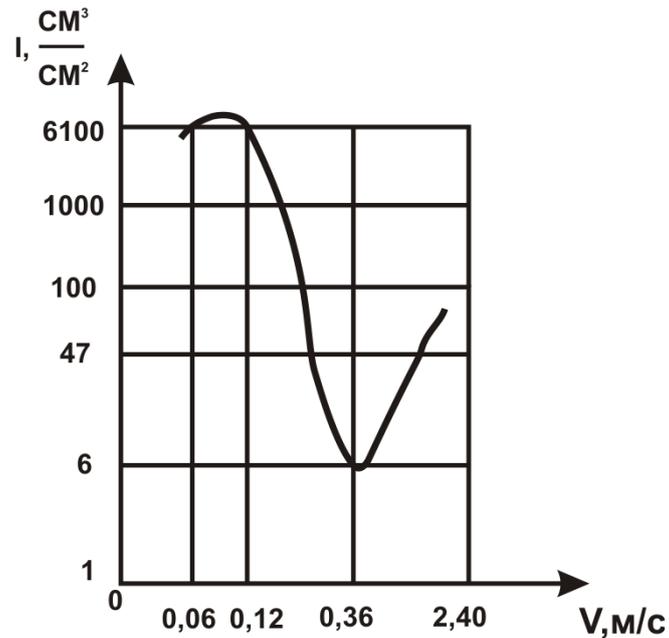


Рис. 7.4. Зависимость интенсивности изнашивания при сухом трении сталей от скорости относительного перемещения  $V$  (по Келю и Зибелю)

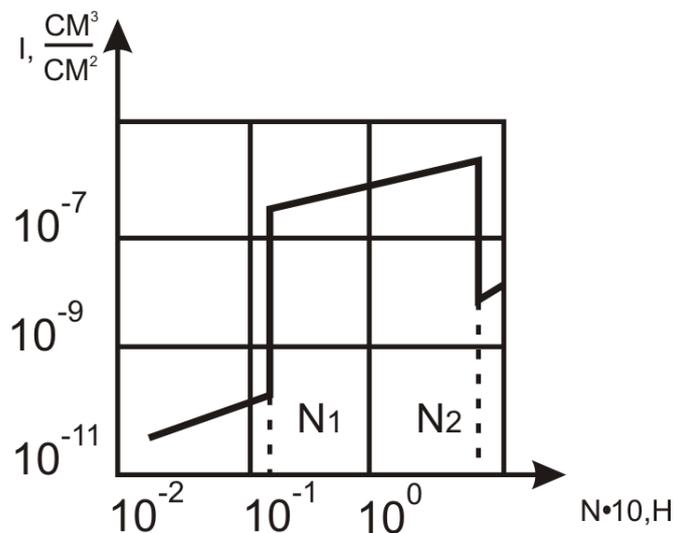


Рис. 7.5. Зависимость интенсивности изнашивания при сухом трении сталей от нагрузки  $N$  по Велшу (скорость относительного скольжения 2,6 м/с)

Повышение нагрузок в контакте приводит к росту интенсивности изнашивания. Когда это приводит к разрушению оксидных пленок, препятствующих непосредственному металлическому контакту трущихся тел, интенсивность изнашивания резко увеличивается (первая критическая точка). Затем изнашивание происходит в условиях заедания до тех пор, пока на поверхностях трения в новых условиях вновь не образуются оксидные пленки, так что изнашивание при заедании сменяется окислительным изнашиванием, происходящим главным образом в условиях упругого деформирования. Дальнейшее увеличе-

ние давления или скорости приводит к разрушению оксидных пленок (т.е. скорость разрушения оксидных пленок будет превышать скорость их образования), и вновь происходит переход к изнашиванию при задании. Таким образом, изменение факторов нагружения узла трения приводит к изменению механизма изнашивания. Следовательно, распространение механизма изнашивания твердых тел на измененные условия нагружения возможно далеко не во всех случаях.

### **7.5. Адсорбционное понижение прочности трущихся тел**

*Эффект Ребиндера.* За счет адсорбирования и попадания в микропоры трущихся тел поверхностно-активных веществ (ПАВ) происходит интенсивное развитие подповерхностных трещин и разрушение поверхностного слоя (преимущественно по межкристаллическим поверхностям). В качестве ПАВ выступают полярные и неполярные молекулы, а в ряде случаев и металлы в жидком состоянии по отношению к другим металлам.

Например, ртуть по отношению к цинку, жидкая медь - к стали, висмут - к меди и т.д. При большом количестве ПАВ микротрещины могут проникнуть внутрь металла и, в конечном счете, привести к разрушению деталей узла трения.

Физически адсорбированные молекулы приводят к уменьшению свободной поверхностной энергии трущихся тел, уменьшению молекулярной составляющей трения и сдвиговых напряжений в поверхностных слоях. В конечном счете, это может привести и к уменьшению интенсивности изнашивания пар трения.

*Температурное воздействие.* Выделяющаяся в результате трения энергия в своей основе реализуется в виде тепла, сконцентрированного в зоне трения. Нагрев в замкнутом объеме поверхностных слоев до температуры 200...500°C приводит к изменению их прочности (для многих материалов с повышением температуры она уменьшается) и других механических параметров, изменению геометрических форм, площади фактического контактирования и дополнительным термоциклическим напряжениям в поверхностном слое.

Нагрев твердых тел при трении одновременно приводит к резкому повышению их химической активности, изменению характера взаимодействия тел не только друг с другом, но и с окружающей средой. Высокие градиенты температур, возникающие в поверхностных слоях, сильно

ускоряют диффузионные процессы, приводящие порой к весьма значительному изменению атомарного состава в поверхностном слое трущихся тел, а, следовательно, и к изменению ряда свойств поверхностей трения, в том числе и свободной поверхностной энергии. Изменения, происходящие в поверхностных слоях, обусловленные диффузионными процессами, получили название *трибомутации*. Умело используя этот процесс, можно существенно сокращать период приработки трущихся тел (при сокращении затрат энергии), уменьшать износ изделия при обкатке узла трения и, благодаря этому, значительно увеличить срок его эксплуатации.

Температурные воздействия на поверхности трущихся тел в ряде случаев приводят к фазовым превращениям в трущемся материале и соответствующим изменениям его физико-механических характеристик и влияют на интенсивность износа трущихся тел. Имеются материалы, которые сами в процессе трения изменяют свою структуру и тем самым существенно увеличивают износостойкость узла трения.

Наклеп поверхностей трения. Высокие удельные давления и температурные поля способствуют образованию новых, движению, выходу и закрытию дислокаций, закрытию микротрещин и уплотнению поверхностного слоя. В конечном случае, это чаще всего приводит к упрочнению поверхностного слоя и повышению износостойкости, прежде всего, при абразивном изнашивании. При весьма значительных деформациях (при осадке материала кристаллической решетки более чем на 20...30%) может происходить развитие микротрещин и трущийся материал может существенно потерять свои механические свойства и быстро разрушиться.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Каковы механические виды и механизмы изнашивания, их разновидности? Методы и пути управления процессами изнашивания.
2. Каковы молекулярно-механические виды и механизмы изнашивания? Понятия положительного и отрицательного градиентов напряжений.
3. Каковы особенности водородного вида и механизма изнашивания в узлах трения?
4. В чем сущность коррозионно-механических видов изнашивания?
5. Каково влияние перехода механизма изнашивания на величину износа трущихся тел?

## Глава 8. ТРИ СТАДИИ ИЗНАШИВАНИЯ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ

Износостойкость трущихся тел во многом определяется процессами, происходящими во фрикционном контакте, т.е. реальными давлениями, температурными процессами, которые в процессе эксплуатации пары трения меняются и наиболее явно выражены во времени.

Наиболее общий вид зависимости, получившей название В.Ф. Лоренца и представляющей суммарный износ от времени работы деталей узла трения, приведен на рис. 8.1. На рисунке показана зависимость быстроты изменения линейного (объемного или массового) износа во времени от исходного, равного нулевому для новых деталей до допустимого  $h_n$ , выше которого наступает катастрофический износ с последующим разрушением трущейся пары.

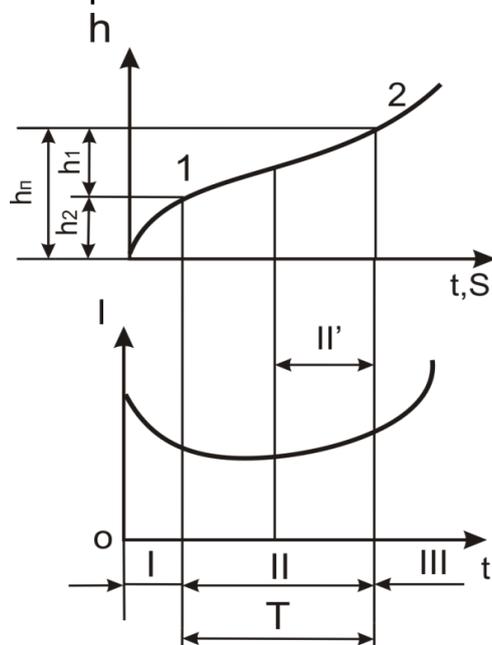


Рис. 8.1. Закономерности изменения линейного износа  $h$  и интенсивности изнашивания  $I$  в процессе обкатки и эксплуатации трущихся тел:  
 $h_n$  - предельный суммарный износ трущихся тел;  $h_1$  - суммарный износ при обкатке;  $h_2$  - суммарный износ при эксплуатации трущихся тел;  
 I - область обкатки; II - область периода эксплуатации трущихся тел;  
 II' - область повышения интенсивности изнашивания в процессе эксплуатации пары трения; III - область катастрофического износа

По зависимости В.Ф. Лоренца можно выделить принципиально отличающиеся во времени и по механизму разрушения три стадии процесса изнашивания трущихся тел (I, II и III).

Первая стадия изнашивания, продолжительность которой составляет незначительную долю от времени работы сопряжения, получила название *приработки* пары или узла трения.

В этот период происходят процессы изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств обоих взаимодействующих фрикционных материалов. На этом этапе на площадях истинного контактирования, во многом определяющихся исходной микрогеометрией и свойствами исходного материала, реализуются очень высокие давления, температурные поля градиенты напряжений и температур. При их действии, а также в результате взаимодействия тел с окружающей средой (воздухом, смазкой и т.д.) в зоне трущихся тел происходят значительные деформационные процессы, диффузионные процессы, меняются молекулярные взаимодействия, свободная поверхностная энергия и др., в десятки раз ускоряется протекание химических реакций.

Направление этих изменений определяется принципом Ле Шателье-Брауна, в соответствии с которым любая система под внешними воздействиями изменяется с максимальным ослаблением первоначально существовавших взаимодействий. В результате адаптации системы к условиям нагружения в поверхностных слоях трущихся тел образуются такие структуры и макро- и микрорельеф, которые, наряду с формированием в процессе приработки на поверхностях трения вторичных структур различного происхождения, обеспечивают минимизацию энергетических затрат и локализацию зоны фрикционного разрушения (износа) в тонком поверхностном слое (рис. 8.2). Окислительно-восстановительные процессы в поверхностных слоях и диффузионные процессы в подповерхностных слоях приводят к тому, что поверхностный слой трущихся тел по своему атомно-молекулярному составу и частицы, отделяющиеся от трущихся тел, могут существенно отличаться от состава и физико-механических свойств исходного материала (по данным А. Жерве и Ю.М. Лужнова). Степень отличия этих свойств во многом связана с режимом нагружения трущихся тел и получила название трибомутации.

В свою очередь, происходящие в зоне фрикционного контакта значительные термоциклические напряжения могут оказывать влияние и на фазовые превращения, происходящие в поверхностных слоях. Правильное и направленное использование этих явлений может во многом повлиять на процессы, связанные с приработкой трущихся тел, и, в конечном счете, на затраты энергии и материалов и продолжительность работы узла трения.

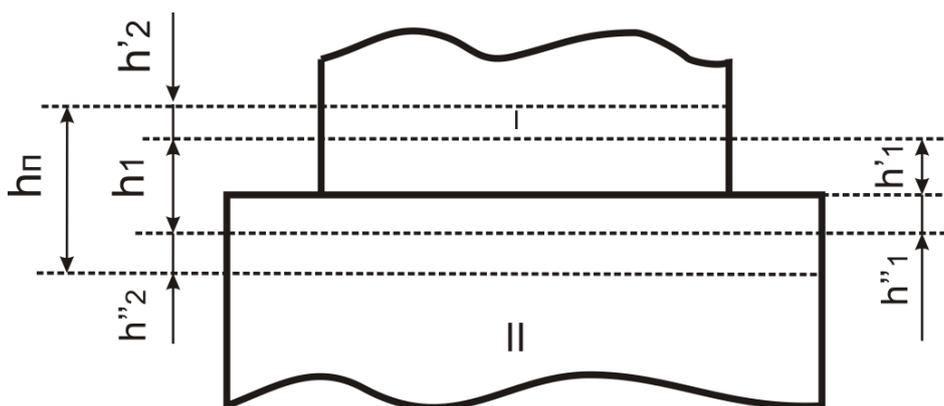


Рис. 8.2. Схема составляющих линейного износа трущейся пары тел: I - менее сложная деталь, способная к более легкой замене (например, подшипник); II - более дорогая и трудно заменяемая деталь (например, коленчатый вал);  $h_p = h_1 + h_2$  - предельный износ, состоящий из износа при обкатке  $h_1$  и износа тел в процессе эксплуатации пары трения  $h_2$ ;  $h_1 = h'_1 + h''_1$  - износ при обкатке, соответственно I и II деталей;  $h_2 = h'_2 + h''_2$  - износ в процессе эксплуатации, соответственно I и II деталей

Исследованиями И.В. Крагельского показано, что в процессе приработки устанавливается определенная для данной трибосистемы шероховатость, не зависящая от величины и характера первоначальной шероховатости, полученной в результате технологической обработки. Она определяется качеством используемого материала и составом окружающей среды (воздуха, смазки и т.д.), а по своей величине установившаяся шероховатость может оказаться как больше, так и меньше исходной, полученной при технологической обработке.

Схема формирования установившейся равновесной шероховатости приведена на рис. 8.3. Для очень гладких поверхностей большую роль на фрикционное взаимодействие оказывает адгезионное взаимодействие между выступами трущихся тел. Молекулярное схватывание и вырыв части микровыступов приводят к образованию уже более высоких выступов (представленных в правой части рисунка). В результате этого процесса при формировании сил трения уменьшается влияние адгезионных сил и начинают играть решающую роль деформационные процессы, а высокие выступы при трении деформироваться и срезаться. Таким образом, путем попеременного вступления в действие адгезионных и деформационных процессов достигается некоторая равновесная шероховатость, характеризующаяся реализацией минимума сил трения и интенсивности изнашивания.

В процессе приработки (рис. 8.1, 8.4) при трении выделяется большое количество материала трущихся тел, по своему объему поч-

ти соизмеримого с износом трущихся тел за весь срок нормальной эксплуатации уже приработанной трибосистемы. Во время приработки сглаживаются и в значительной степени «снимаются» несоответствия в конструкции узла трения, приобретенные как при изготовлении его деталей (например, такие, как несоблюдения в плоскостности, отклонения в углах и диаметрах контактирующих тел), так и при сборке узла трения (недостаточная посадка, перекосы и т.д.).

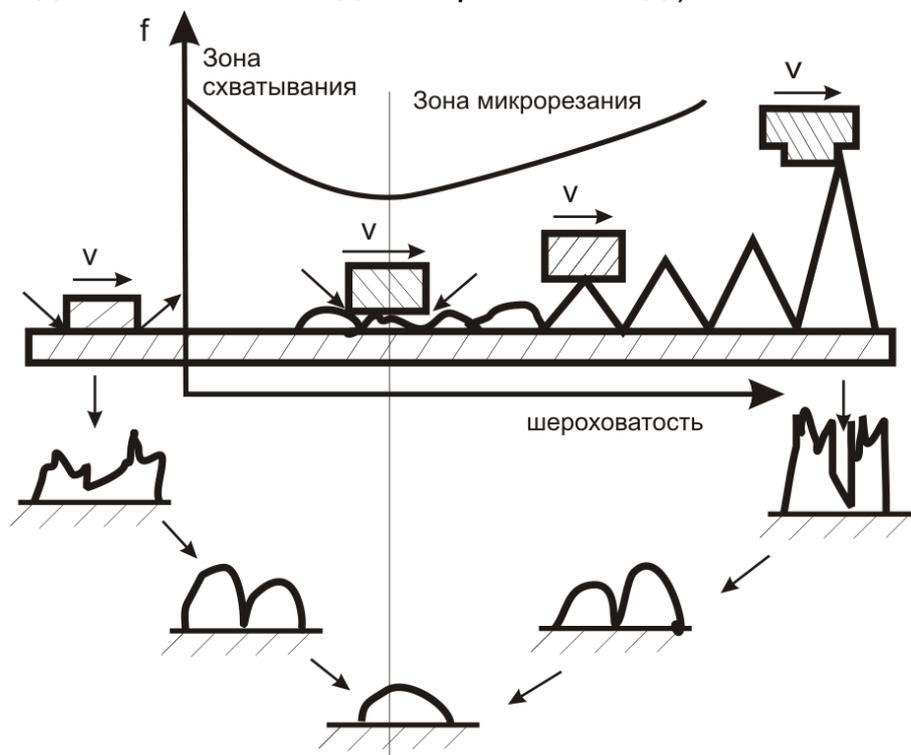


Рис. 8.3. Формирование равновесной шероховатости по И.В. Крагельскому

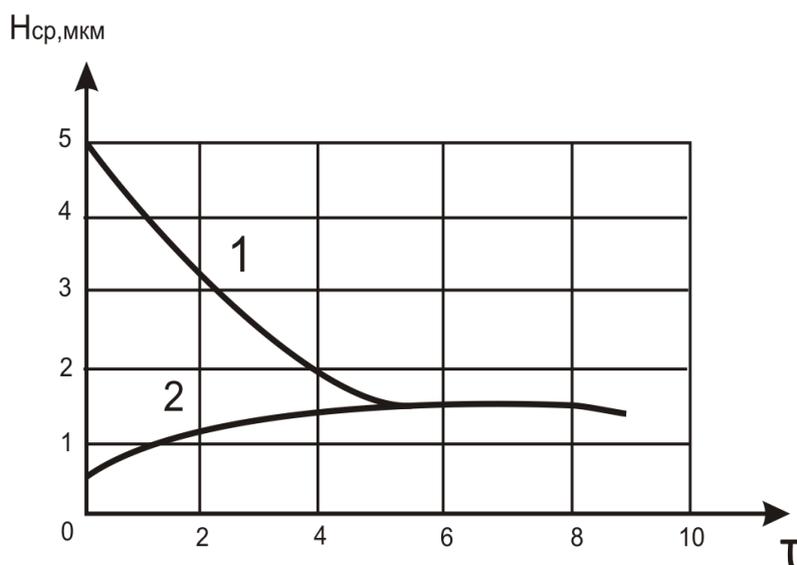


Рис. 8.4. Влияние времени приработки на высоту неровности  $H_{ср}$  (пара трения стальной вал — бронзовый вкладыш): 1 -  $H_{ср} = 5,4$  мкм; 2 -  $H_{ср} = 0,5$  мкм (трение по бронзовым вкладышам)

*Во второй стадии изнашивания* фрикционных пар (см. рис. 8.1) трение стабилизируется, интенсивность изнашивания снижается и в среднем остается практически неизменной. Исключением из этого могут быть отдельные всплески на этой зависимости, вызванные нарушениями в режиме эксплуатации узлов трения. Например, при запуске двигателя, когда в узлы трения еще не попала смазка, или при работе с низкими температурами, когда в зоне трения реализуется режим масляного голодания, или в условиях, когда увеличиваются внешние воздействия, например, перегруз автомобиля или движение по крутому подъему. Эти всплески интенсивности изнашивания обычно бывают непродолжительными и поэтому не сильно искажают общую картину интенсивности изнашивания узлов трения машин. Однако они свидетельствуют о том, что к обслуживанию узлов трения машин в условиях эксплуатации следует относиться с большим вниманием, поскольку при длительной недооценке этих процессов они могут значительно повысить угол наклона кривой на участке 1-2 (см. рис. 8.1), т.е. привести к росту интенсивности изнашивания и сокращению периода нормальной эксплуатации узла трения. В процессе постепенного изнашивания трущихся тел увеличиваются зазоры в сочленениях машины, могут возникать перекосы и перераспределение усилий и нагрузок между парами трения. Это приводит к тому, что к концу этого периода износ трущихся тел несколько повышается, внешние воздействия увеличиваются, и период относительно стабильной работы узла трения заканчивается.

*Третья стадия изнашивания* начинается с момента, когда под действием динамических факторов резко увеличивается интенсивность изнашивания, достигая своей катастрофической величины, и узел трения выходит из строя (повреждается). Для разных материалов и конструкций узлов трения представленные выше стадии изнашивания будут разными по величине и крутизне хода кривых, однако общий характер их по форме сохраняется.

### **8.1. Распределение износа между трущимися телами по их рабочим поверхностям**

Износы в узлах трения распределяются между трущимися деталями достаточно неравномерно. При этом одно из трущихся тел может подвергаться одному виду изнашивания, а другое - другому. Так, при пуске-останове неровности закаленного стального вала подвер-

гают поверхностные слои вкладыша, изготовленного из мягкого антифрикционного сплава, абразивному изнашиванию. Сама же поверхность вала подвергается намного менее интенсивному усталостному изнашиванию. В то же время, если слой смазочного материала, разделяющего поверхность вала и подшипника, разрушается при повышении температуры и реализуется металлический контакт этих поверхностей, то могут иметь место схватывание трущихся тел и изнашивание адгезионного типа. В том же случае, если в смазочный материал попадает абразив, то он поглощается подшипниковым сплавом, закрепляется в нем и начинает изнашивать шейку вала. Даже при одинаковых материалах износ трущихся тел различен - обычно большая поверхность теряет больше по массе.

Распределение износа по рабочим поверхностям трущихся элементов контактирующих тел также зависит от ряда факторов, из которых наибольшее влияние оказывают схема контакта, условия нагружения, соотношение физико-механических свойств трущихся материалов, режим работы сопряжения и вид изнашивания. Износ детали по поверхностям трения далеко не всегда бывает равномерным, причем характеристикой изнашивания на отдельных участках поверхностей трения являются местные износы на этих участках. Для графического изображения распределения значений местного износа по поверхности трения или по определенному ее сечению используют эпюры износа. Так, для сопряжения вал-втулка эпюра износа совпадает по внешнему виду с эпюрой распределения нормального давления и температуры. Если вал вращается в неподвижной опоре, то его износ будет равномерно распределен по его поперечному сечению, а на втулке будет образовываться местная выработка, смещенная от вертикальной оси в направлении вращения вала (это явление наблюдал еще Леонардо да Винчи). Если вал неподвижен, а втулка вращается, то равномерно будет изнашиваться рабочая поверхность втулки, а односторонний износ (выработка) будет наблюдаться уже на валу.

Рабочие поверхности зубьев шестерен подвержены главным образом усталостному изнашиванию, что выражается в образовании осповидных раковин на ножках зубьев в зоне полюса зацепления, т.е. здесь в основном имеет место трение качения. В дальнейшем наблюдается развитие усталостных микротрещин и выкрашивание частиц ме-

талла, причем наиболее интенсивно это происходит на отстающей поверхности в зоне нижней части зуба. В то же время на участках зуба, где имеет место проскальзывание, могут развиваться интенсивное натирание и заедание. Направление следов заедания совпадает с направлением скольжения профилей зубьев. Какой из этих видов изнашивания является ведущим, зависит от конкретных условий работы зацепления.

Рабочие поверхности цилиндрических втулок также подвержены неравномерному износу. При изнашивании коррозионно-механического типа максимальные износы наблюдаются в верхней части - напротив компрессионных колец при положении поршня в верхней точке, так как в этой зоне давление поршневых колец на стенку втулки достигает наибольшей величины и наблюдаются максимальные температуры. Если же изнашивание имеет абразивный характер, то гильза, согласно В. Винкенсу, больше изнашивается в средней части.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какова зависимость изнашивания по В.Ф.Лоренцу?
2. Каково распределение износа по трущимся телам фрикционной пары?
3. Каковы особенности первой стадии изнашивания?
4. Каковы особенности второй стадии изнашивания?
5. Каковы особенности третьей стадии изнашивания?
6. Какие существуют возможные пути управления износом?

### Глава 9. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗНАШИВАНИЯ

К настоящему времени разработан ряд методов расчетов на изнашивание. За рубежом широко используется закон Арчарда, согласно которому для абразивного и адгезионного изнашивания объемный износ  $V$  трущихся тел пропорционален пути трения  $S$  и площади фактического контакта этих тел  $A_r$

$$V = K_{И} \cdot A_r \cdot S,$$

что для пластического контакта принимает вид

$$\frac{V}{S} = K_{И} \cdot \frac{P}{3 \cdot \sigma_T} \approx K_{И} \cdot \frac{P}{H},$$

где  $K_{И}$  - коэффициент износа;  $\sigma_T$  - предел текучести;  $H$  - твердость по Бринеллю более мягкого элемента пары трения.

Коэффициент износа  $K_{И}$  представляет собой безразмерную величину, характеризующую вероятность отделения частиц износа при трении. Значения коэффициента износа различных материалов при трении их по закаленной стали (кроме особо оговоренных случаев) приведены в табл. 9.1 для условий сухого трения.

Таблица 9.1

## Коэффициенты износа по Арчарду

Материал	Коэффициент износа $K_{И}$
Мягкая сталь по мягкой стали	$7 \cdot 10^{-3}$
Латунь	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Фторопласт	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Полиэтилен	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Закаленная инструментальная сталь	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Бериллиевая бронза	$3,7 \cdot 10^{-5}$

Для абразивного изнашивания  $K_{И}$  зависит от формы изнашивающихся элементов. Так, для острого напильника  $K_{И} = 0,1$ ; новой абразивной бумаги - 0,01; округленных абразивных частиц - 0,001.

Влияние смазочного материала на величину  $K_{И}$  приведено в табл. 9.2.

Таблица 9.2

## Коэффициент износа для различных условий смазки

Условия	Металл по металлу		Неметалл по неметаллу
	одноименные	разноименные	
Трение без смазки	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
«Бедная» смазка	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
«Средняя» смазка	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
«Хорошая» смазка	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Уравнение Арчарда является весьма неточным, оно не учитывает влияния на износ твердых тел их температуры, скорости скольжения и геометрии контакта, а также микрогеометрии контактирующих тел и наличия критических точек на зависимостях интенсивности изнашивания от факторов нагружения.

Методика расчетов на изнашивание, разработанная И.В. Крагельским и его школой, рассматривает понятие удельного износа  $i$ , т.е. съема материала объемом  $\Delta V$ , на единицу фактической площади контакта  $A_f$  на пути скольжения, равном среднему диаметру пятна контакта  $d$ , т.е.

$$I_h = \frac{\Delta V}{d \cdot A_f} = \frac{\Delta h}{d},$$

где  $\Delta h$  - толщина изношенного слоя материала.

Для расчета интенсивности изнашивания  $I_h$  может быть использовано уравнение

$$I_h = i_h \cdot \alpha \cdot \frac{P_a}{P_r},$$

где  $P_a$  - номинальное контактное давление;  $P_r$  - фактическое контактное давление;  $\alpha$  - отношение номинальной площади контакта к площади трения.

Это уравнение справедливо для описания процесса изнашивания при любом его механизме. Так, применительно к стационарному процессу усталостного изнашивания оно имеет вид

$$I = k \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{R} \cdot \frac{P_a}{P_r} \cdot \frac{1}{n}},$$

где произведение безразмерной глубины зоны деформирования  $h/R$  и безразмерной площади контакта  $A_a/A_r$  представляет собой безразмерный объем деформируемого материала, коэффициент  $k$  обусловлен расположением неровностей поверхностей по высоте, а  $1/n = 10^{-2} \dots 10^{-10}$  характеризует склонность материала к разрушению при многократном деформировании (т.е. определяет сопротивление усталости).

Эти величины определяют, исходя из значений предела прочности материала при растяжении  $\sigma_B$  и действующего напряжения  $\sigma_{пр}$ , по эмпирическим формулам вида

$$n = \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{пр}} \right)^{t_y},$$

где  $t_y$  - параметр кривой фрикционной усталости.

Определение других параметров, входящих в уравнение для расчета интенсивности усталостного изнашивания, рассмотрено в предыдущих разделах.

### **9.1. Общие закономерности измерения силы трения и скорости изнашивания в зависимости от условий нагружения**

При работе машины на скорость изнашивания влияют:

1) увеличение (уменьшение) номинальной площади контакта с соответствующим изменением контактной нагруженности деталей машин;

2) увеличение внешнего силового воздействия вследствие роста динамических нагрузок и появления дополнительных нагрузок при перекосе и заклинивании изношенных деталей;

3) ухудшение условий снабжения трущихся поверхностей смазкой и нарушение нормального для данного сопряжения режима смазки (утечки, снижения вязкости, потери гидродинамического эффекта и т.п.);

4) интенсификация выделения тепла и ухудшение его отвода;

5) нарушение кинематических связей трущихся деталей;

6) увеличение количества и размеров твердых частиц, попадающих извне в зону трения (при увеличении зазора между деталями, при износе уплотнений и т.п.);

7) увеличение удельных затрат энергии и топлива на работу узла трения.

Все это, в конечном счете, определяет срок службы детали узла трения, прошедшего обработку, по его допустимому предельному износу  $h_n$

$$T = \frac{(h_n - h_1)}{J_2},$$

где  $h_1$  - износ после обкатки;  $J_2$  - скорость изнашивания в нормальных условиях эксплуатации машины.

При многообразии трущихся пар, машин, рабочих сред и т.п. в подавляющем большинстве случаев измерения коэффициентов трения от нагрузки или скорости относительного скольжения имеется участок, на котором коэффициенты трения бывают приблизительно неизменными и минимальны по сравнению со значениями коэффициентов трения вне этого участка. Условно этот участок называют участком стационарного трения и изнашивания. Принципиальная схема коэффициента трения от нормального давления и скорости скольжения на примере ряда распространенных пар трения представлена на рис. 9.1. На нем приведены результаты эксперимента пар трения: I - сталь 45 - сталь 45; II - сталь У8А - сталь У8А (закаленная, без смазки); III - сталь 38ХМЮА - бронза БрОЦС-6-3 (граничная смазка). Из анализа результатов этих исследований следует, что данные различных исследователей отличаются друг от друга только масштабом явления - границами стационарного участка и значениями коэффициентов трения на этом участке. Эти границы зависят как от скорости скольжения, так и от дав-

ления на фрикционном контакте, от свойств контактирующих материалов, физико-химических свойств смазки и газовой среды. Каждые из них, в свою очередь, характеризуют механические, молекулярно-механические и коррозионно-механические процессы, развивающиеся во фрикционном контакте. Скорость процессов механического и химического взаимодействия поверхностей трения и среды и составляющие процесса диссипации находятся в определенных соотношениях с результатами фрикционного взаимодействия. Таким образом, при рассмотрении зависимости коэффициента трения и соответствующих параметров, характеризующих интенсивность изнашивания тел, от условий нагружения могут быть выделены области скоростей, при которых трение и износ будут минимальными, а также и режимы, при которых будут реализовываться неблагоприятные режимы трения.

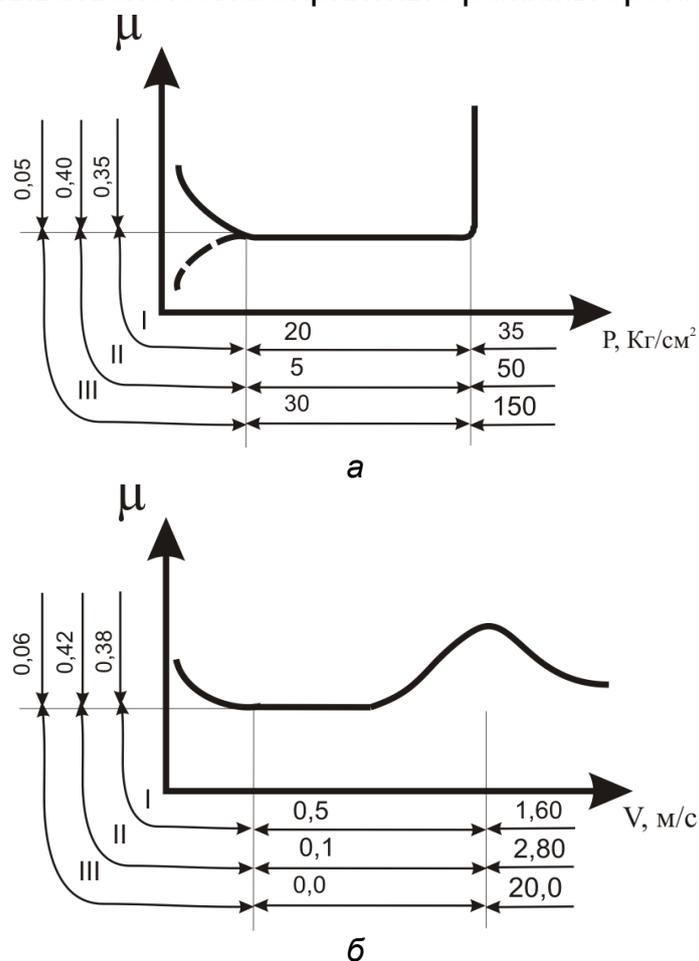


Рис. 9.1. Зависимость коэффициента трения от нормального давления и скорости скольжения: а - нормальные давления: I и II - 10 кг/см<sup>2</sup>; III - 30 кг/см<sup>2</sup>; б - скорости скольжения: I - 1 м/с, II - 1,5 м/с, III - 5 м/с

На рис. 9.2 представлена принципиальная схема зон нормально-го трения и износа (область I), зоны повреждаемости (области III и IV) и

переходная зона (область II). Для разных трущихся пар и сред эти области будут большими или меньшими, более широкими или узкими. Для каждой пары трения и среды будут свои собственные для них области со специфическими условиями трения и износа. Зависимости, представленные на рис. 9.2, свидетельствуют и о том, что в природе нет абсолютно износостойких или неизносостойких материалов, а есть только диапазоны режимов (скоростей и давлений), при которых в определенных условиях данный материал работает как износостойкий. За пределами этого диапазона режимов этот же материал уже ведет себя как неизносостойкий. И только для определенных машин и оборудования, для которых имеются вполне определенные режимы и среда, можно подобрать материал, который для нее окажется износостойким и с наименьшими потерями энергии (с меньшим коэффициентом трения).

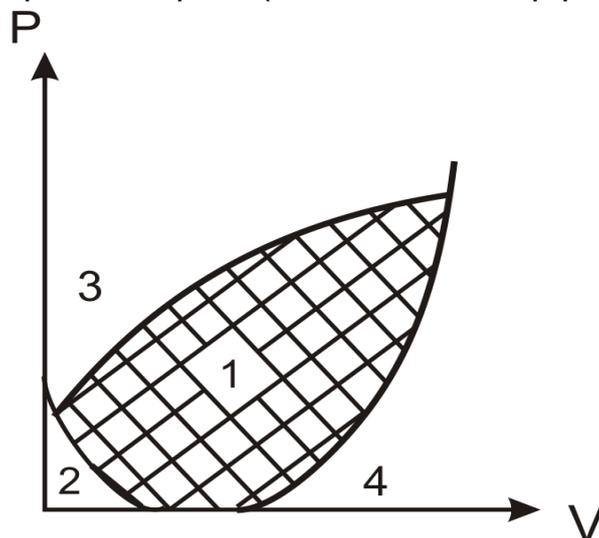


Рис. 9.2. Схема расположения областей нормального трения и износа:  
 I - стационарная область; II - переходная область;  
 III и IV - области повреждаемости

## 9.2. Понятие износостойких и неизносостойких материалов

Каждый материал в зависимости от режима нагружения (нагрузки, скорости скольжения) может быть как износостойким, так и неизносостойким.

В процессе эксплуатации (старение машины) реальные нагрузки возрастают: увеличиваются зазоры, биения и т.п., происходит нарушение согласованности условий удовлетворительной работы узла трения (рис. 9.3).

Для каждого материала имеется вполне определённая форма и размеры зоны (рис. 9.4). Зона I - это область реализуемых режимов,

когда данный материал ведёт себя как износостойкий. Зоны II, III, IV - области режимов трения, где этот же материал ведёт себя как неизносостойкий. Для разных материалов размер и расположение зоны I различны. Только при согласовании всех четырёх факторов возможна удовлетворительная работа узла трения (с малыми потерями).

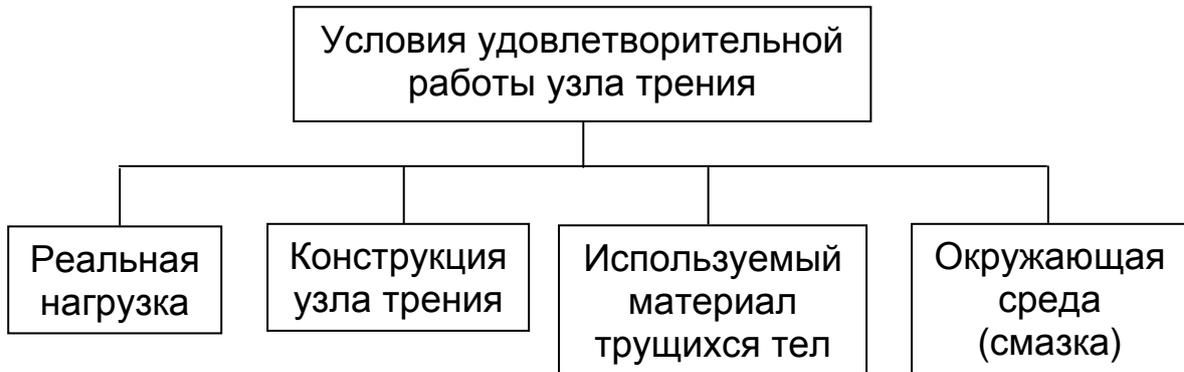


Рис. 9.3. Условия удовлетворительной работы узла трения

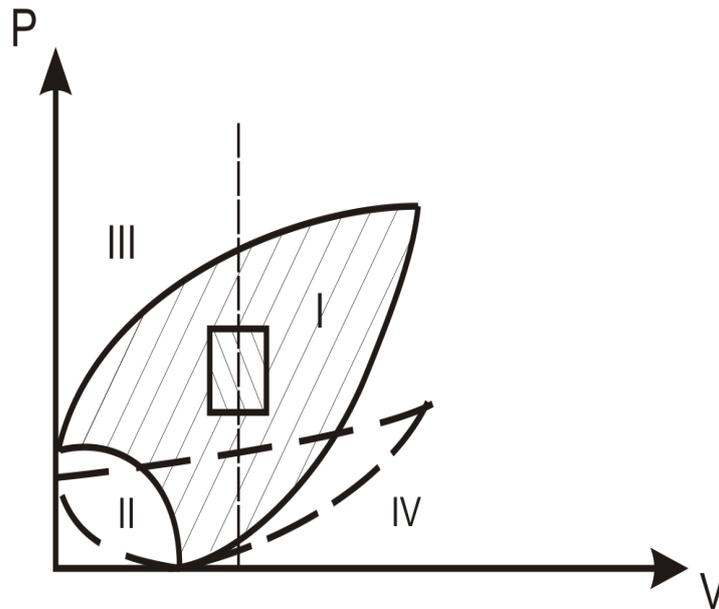


Рис. 9.4. Схема расположения областей нормального трения и износа для двух материалов

### 9.3. Основные направления совершенствования триботехнических свойств подшипников скольжения и качения

**Подшипники качения.** В подшипниках качения всегда присутствует площадь контактирования, где реализуется процесс относительного скольжения одной поверхности по другой. На это затрачивается значительная часть работы трения (помимо гистерезисных потерь, реализуемых в контактирующих телах). В качестве плакирующего материала используют медь, олово или серебро, которым заполняются

впадины дорожек катания. Толщина плакирующих покрытий не превышает 1...2 мкм. Эта толщина находится в пределах внутренних отклонений размеров. Применение плакирующих элементов приводит к увеличению опорной поверхности контактирующих тел. Пластичные свойства тонкого покрытия выравнивают микрометрию поверхностного слоя, уменьшая среднее удельное давление, и снижают сопротивление сдвигу в случае масляного голодания в зоне контакта. Масляное голодание в зоне контакта в подшипниках качения наблюдается как в момент начала движения, так и в случае его вращения с большой скоростью. Пластичный слой на твёрдой поверхности качения снижает вероятность задира дорожек трения и интенсивность изнашивания подшипников качения (рис. 9.5).

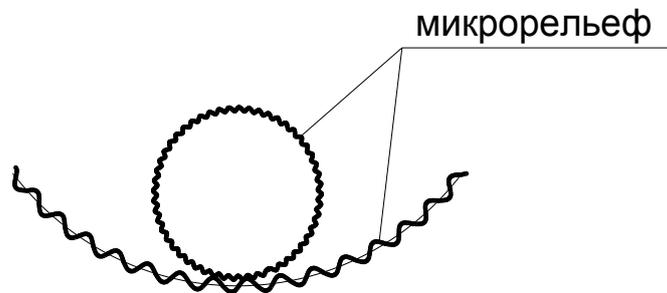


Рис. 9.5. Подшипник качения

*Подшипники скольжения.* Тенденции развития технологии производства подшипников скольжения за рубежом сводятся к использованию комбинации свойств контактирующих материалов (рис. 9.6).

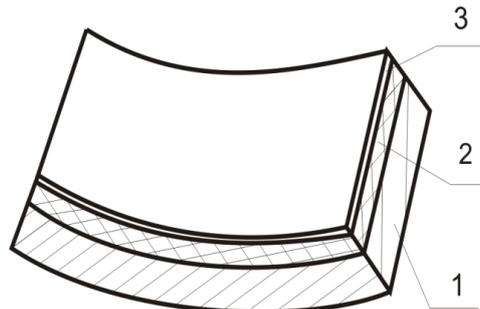


Рис. 9.6. Подшипник скольжения: 1 - несущий слой; 2 - промежуточный слой; 3 - слой легкого деформирования (антифрикционный)

На поверхность основы накладывают порошок из баббита, излишки убирают (толщина этого слоя 1...2 мм). Далее подшипник помещают в камеру с нейтральным газом и нагревают до температуры 700°C. Происходит процесс образования мостиков сваривания между этими частицами и основанием. Формируется пористый материал из частиц баббита. После образования мостиков сваривания поверхно-

стный слой насыщают полимерами (тефлоном, тефлоном с частицами дисульфида молибдена или графитом). После образования этого слоя создаётся поверхностный слой толщиной 0,2...0,3 мм.

Свойства таких подшипников:

1) лучшая теплопроводность за счёт отвода тепла из зоны трения по мостикам сваривания;

2) пластичный материал, заполняющий поры, пространства, является смазочным материалом;

3) по мере изнашивания поверхностного слоя 3 в контакт входит слой 2, состоящий из полимеров и баббита, который имеет более высокие механические свойства по отношению к слою 3 и обладает самосмазывающим эффектом (см. рис. 9.6).

Нормальной эксплуатацией считается трение в условиях смазывания жидкими смазочными материалами.

Слой 3 снижает касательные напряжения, возникающие в несущем слое. Слои 2 и 3 предназначены для наиболее неблагоприятных условий трения, когда в трущихся парах появляются задиры и схватывания трущихся тел. Задиры менее опасны, если подшипники состоят из двух слоев - 1 и 3. Иногда слой 2 снижают до минимума или убирают вообще.

Подшипники, работающие без смазки, имеют ресурс, значительно меньший, чем подшипники, работающие в смазке. Кроме того, они ограничены по нагрузочной способности и скорости. По внешнему виду они похожи на подшипник, изображенный на рис. 9.7.

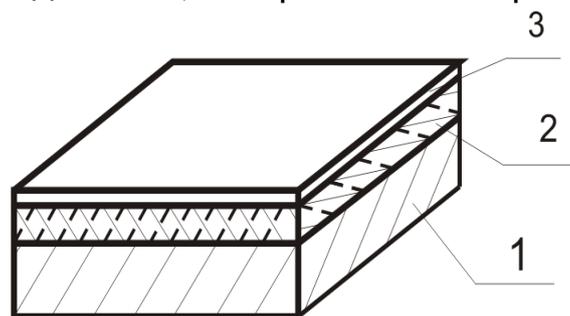


Рис. 9.7. Подшипник скольжения: 1 - несущий слой; 2 - промежуточный слой; 3 - слой легкого деформирования (антифрикционный)

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какова область использования закона Арчарда для расчетов на износ?

2. В чем сущность методики расчета на изнашивание по И.В. Крагельскому? Понятие удельного износа.

3. Каковы особенности зависимости фрикционных свойств трущихся тел от нормального давления и скорости скольжения?

4. Каково влияние режима нагружения узла трения (по нормальному давлению и скорости скольжения) на реализацию стационарной области нагрузок (нормального трения и изнашивания) и переходной и аварийной области его работы?

## Глава 10. СМАЗКА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 10.1. Основные понятия и определения

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности подвижных сопряжений деталей машин и механизмов и минимизации энергетических потерь при их эксплуатации является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов. Смазочный материал в реальных машинах всегда присутствует и рассматривается в трибологии как самостоятельное *третье тело*. Это третье тело взаимодействует как с первым и вторым телами, так и с окружающей средой. В ряде случаев окружающая среда оказывается способной влиять на изменение свойств первого, второго и третьего тел. При этом существует взаимное влияние между каждым телом и внешней средой.

*Смазочные материалы* – это продукты органического и неорганического происхождения, которые вводят между поверхностями с целью уменьшения потерь на трение в этом сопряжении, предотвращения заедания и снижения износа пар трения (рис. 10.1). Внутреннее трение в смазочных материалах 3 существенно меньше, чем внешнее трение несмазанных деталей 1 и 2, а исключение или минимизация непосредственного контакта пар трения приводит к улучшению фрикционно-износных характеристик сопряжения трущихся тел.

Смазочный материал является важнейшим конструкционным элементом узла трения, во многом определяющим его надежность и долговечность, а также потери энергии при его функционировании.

Как конструктивный элемент узла трения смазочный материал выполняет следующие функции:

- 1) уменьшает трение между сопряженными деталями узла;
- 2) снижает износ и предотвращает задиры трущихся поверхностей;
- 3) отводит тепло от трущихся поверхностей;

- 4) защищает поверхности трущихся и смежных с ними деталей от коррозии;
- 5) уплотняет зазоры между сопряженными деталями;
- 6) удаляет из зоны трения продукты износа, коррозии и прочие загрязнения.

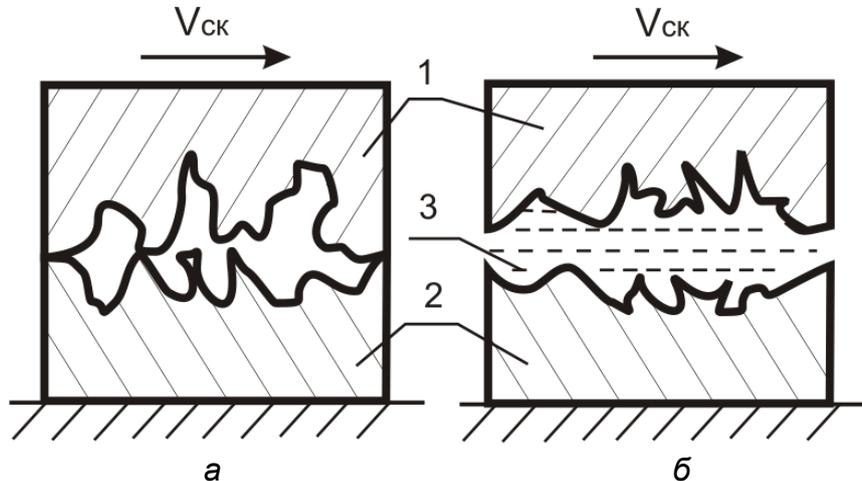


Рис. 10.1. Схема несмазанного (а) и смазанного (б) контактов трущихся тел: 1 и 2 - трущиеся тела; 3 - смазочный материал

По своей структуре смазочный материал (рис. 10.2) представляет собой основу (базовый материал), состоящую из веществ разной природы, и непосредственно материал, осуществляющий выбранное конструктором направленное действие. Важная роль в этом отводится и связующему элементу, ответственному за устойчивое взаимодействие базового материала, присадок и особенно поверхностей трущихся тел.

*Смазка* – это действие смазочного материала, в результате которого уменьшается трение контактирующих тел и (или) снижается их износ. В роли смазочного материала могут выступать адсорбционные слои, специальные жидкости и твёрдые тела. Поэтому смазка и смазочные материалы в основном бывают следующие (рис. 10.3):

- 1) газовая. Используется газообразный смазочный материал. Газовая смазка разделяется на газодинамическую и газостатическую;
- 2) жидкостная смазка. Используется жидкий смазочный материал;
- 3) жидкостная смазка разделяется на гидродинамическую, гидростатическую и граничную;
- 4) твёрдая смазка. Используется твёрдый смазочный материал либо самосмазывающийся смазочный материал;
- 5) пластичная смазка. Занимает промежуток между жидкостными и твёрдыми смазками.

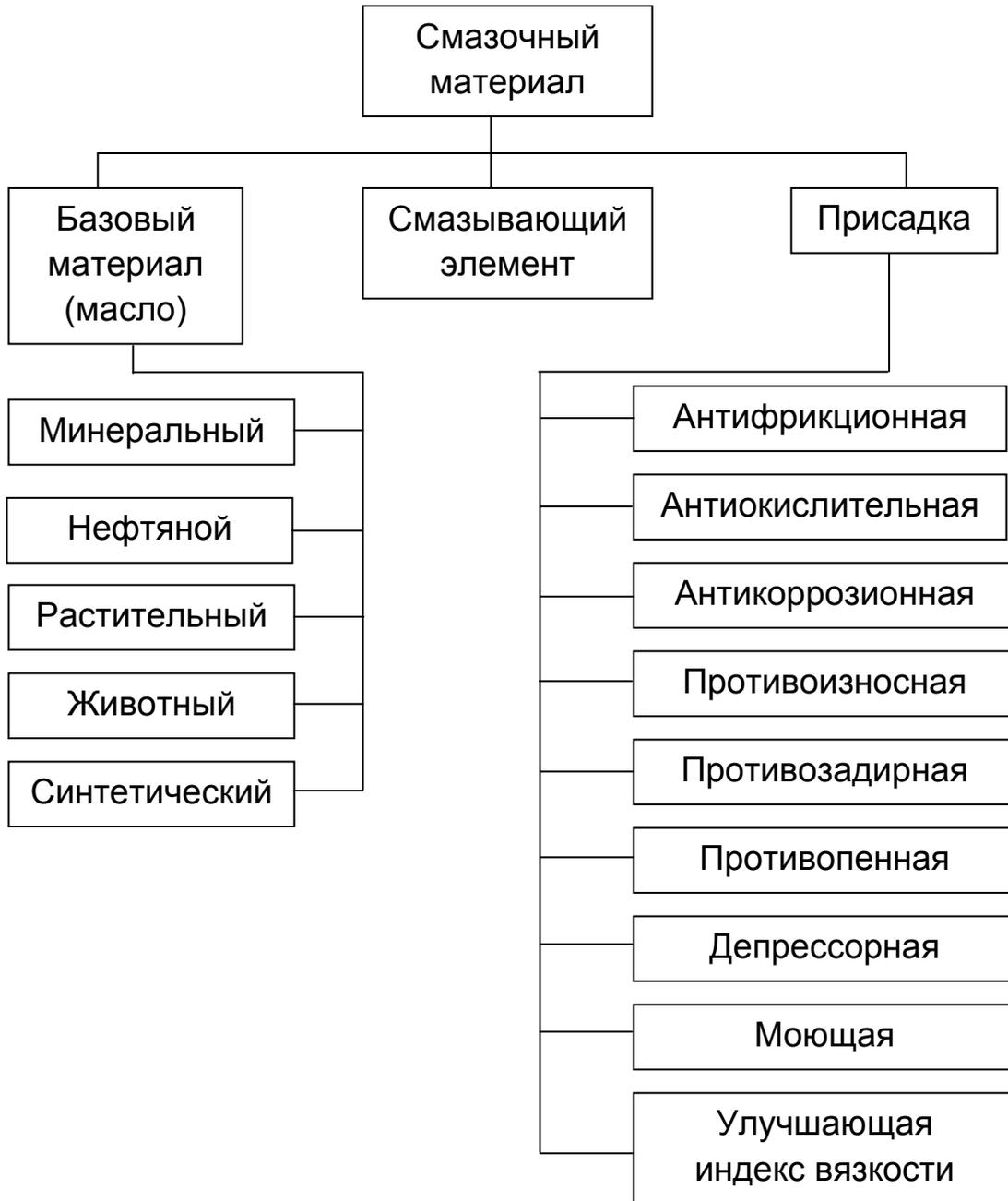


Рис. 10.2. Состав смазочного материала

## 10.2. Жидкие смазочные материалы

Смазка, при которой осуществляется полное разделение трущихся поверхностей сопряженных деталей жидким смазочным материалом, называется *жидкостной*, а если это разделение осуществляется газом, то *газовой смазкой*. В этих случаях полностью исключен непосредственный контакт трущихся тел. Он возможен только при пусках и остановках, когда жидкостный (газовый) слой еще не образовался или уже разрушился. Внешнее трение твердых тел при этом отсутствует, его заменяет много меньшее внутреннее трение смазочной среды, разделяющей эти тела.

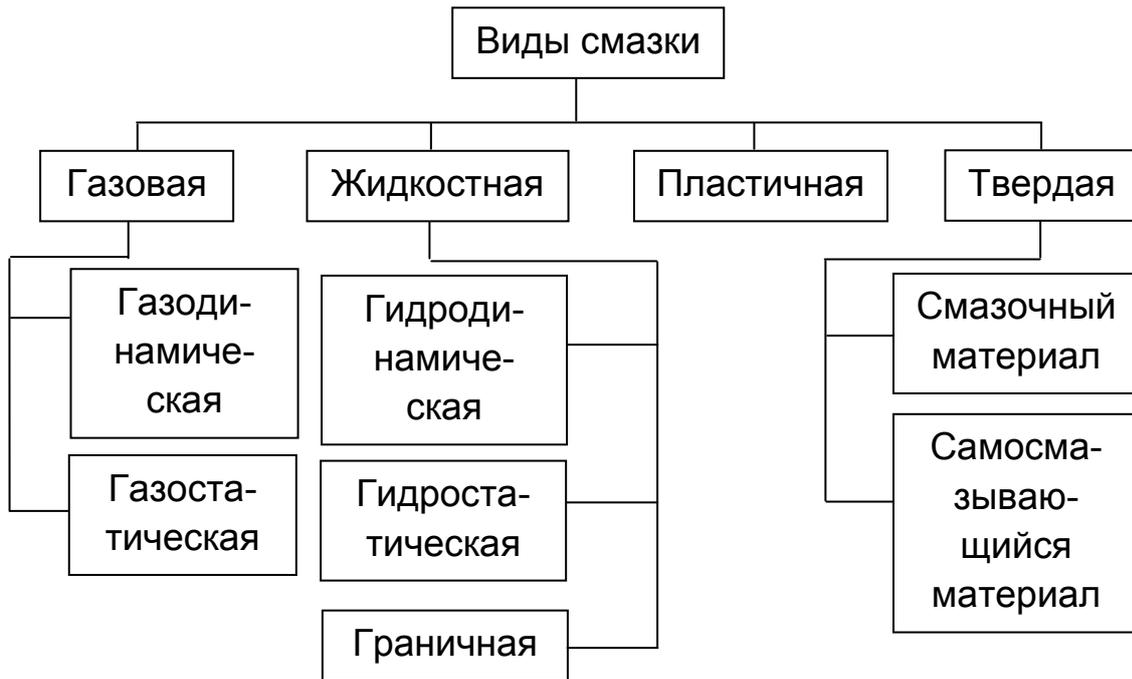


Рис. 10.3. Виды смазки

Сопротивление относительно перемещению твердых тел, полностью разделенных слоем жидкости или газа, определяется внутренним трением этой среды, т.е. ее *вязкостью*. Под вязкостью понимают объемное свойство газообразного, жидкого, полужидкого или полутвердого вещества оказывать противодействие относительно перемещению составляющих его частиц. Простая модель трения при жидкостной смазке приведена на рис. 10.4. Две параллельные пластины 1 и 2 бесконечной длины разделены слоем жидкости толщиной  $h$ . Пластина 1 перемещается со скоростью  $u_1$ , а пластина 2 неподвижна ( $u_2 = 0$ ).

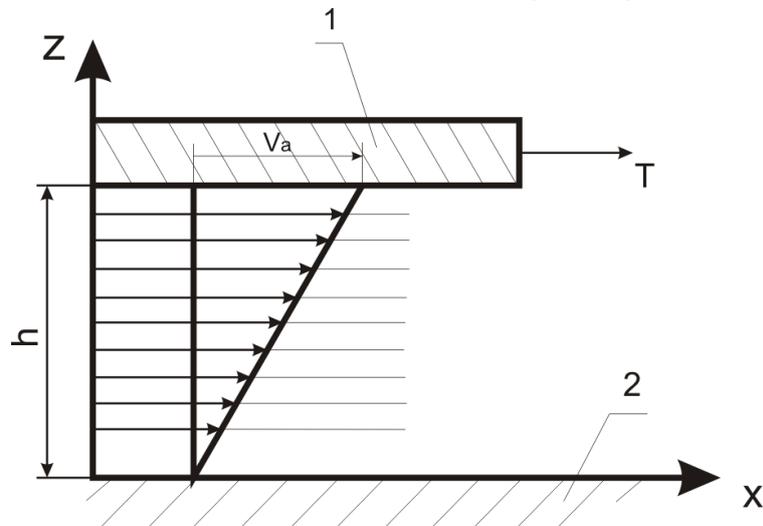


Рис. 10.4. Схема течения жидкости между двумя параллельными пластинами 1 и 2

Так как молекулы жидкости в слоях, прилегающих к пластинам, прилипают к ним, то на границе с пластиной 1 внешний слой жидкости увлекается ею и имеет скорость  $V_a = u_1$ , а на границе с пластиной 2 жидкость имеет скорость  $V_2 = 0$ . При малой скорости относительного перемещения пластины 1 можно допустить линейный профиль скоростей по толщине зазора. А в случае же перемещения ориентированных друг относительно друга плоскостей твердых тел под некоторым углом (рис. 10.5) возможным становится и реализация неравномерного профиля скоростей в зазоре между трущимися телами.

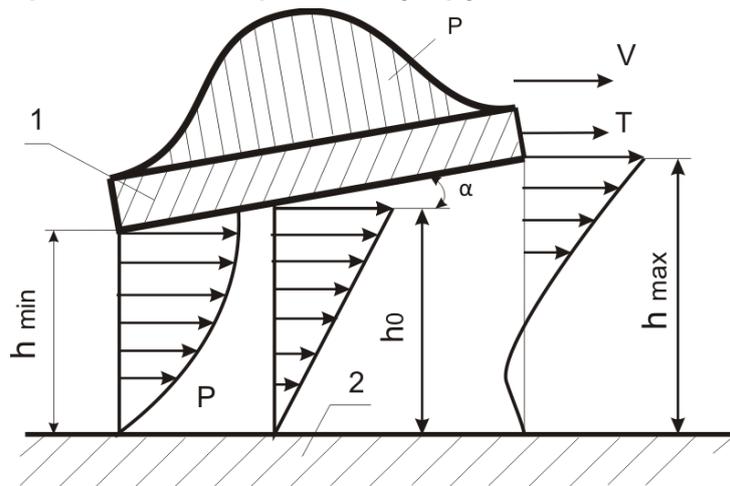


Рис. 10.5. Эпюры скорости и давления в клиновидном зазоре твердых тел:  $h_{min}$  – толщина слоя на входе в зазор;  $h_0$  – толщина слоя в сечении максимального давления;  $h_{max}$  – толщина слоя на выходе из зазора

Согласно закону вязкого течения, сформулированному И. Ньютоном, сила внутреннего трения  $F_T$  для ламинарного режима течения прямо пропорциональна производной скорости и площади сдвига

$$F_T = \eta \cdot A \cdot \frac{dV_x}{dz},$$

где  $A$  – площадь сдвига;  $\eta$  – динамическая вязкость.

Среды, которые подчиняются данному закону, называются истинно вязкими или ньютоновскими. Течение многих нефтяных и растительных масел при температурах, далеких от температур застывания достаточно хорошо описывается этой зависимостью, т.е. они являются ньютоновскими, а, следовательно, теория жидкостной смазки создана, прежде всего, для ньютоновских жидкостей. К жидкостям, поведение которых не отвечает закону Ньютона (так называемым неньютоновским или аномальным), относят нефтяные масла при низких температурах, некоторые коллоидные растворы и суспензии.

Соответствие между классами вязкости моторных масел  
по ГОСТ 17479.1 и по SAE J 300 JUN87

Класс вязкости		Класс вязкости	
ГОСТ 17479.1	SAE	ГОСТ 17479.1	SAE
3 <sub>з</sub>	5 W	24	60
4 <sub>з</sub>	10 W	3 <sub>з</sub> /8	5 W - 20
5 <sub>з</sub>	15 W	4 <sub>з</sub> /6	10 W - 20
6 <sub>з</sub>	20 W	4 <sub>з</sub> /8	10 W - 20
6	20	4 <sub>з</sub> /10	10 W - 30
8	20	5 <sub>з</sub> /10	15 W - 30
10	30	5 <sub>з</sub> /12	15 W - 30
12	30	6 <sub>з</sub> /10	20 W - 30
14	40	6 <sub>з</sub> /14	20 W - 40
16	40	6 <sub>з</sub> /16	20 W - 40
20	50		

Жидкие смазочные материалы, на долю которых приходится более 90% всех смазочных материалов, состоят, в свою очередь, на 70...98 % из основы, которая предназначена для того, чтобы удерживать активные смазочные элементы. Остальной объём занимают поверхностно-активные вещества, предназначенные для непосредственного воздействия на трущиеся тела. Эти вещества называются *присадками*. Очень важно правильно подобрать соотношение между присадками.

По своему назначению присадки подразделяются (см. рис. 10.2) на:

- антифрикционные;
- противоизносные;
- противозадирные;
- антикоррозионные.

Эти виды бывают также объединены и в понятии *многофункциональной присадки*. Кроме того, существуют антиокислительные, противопенные, диспергирующие (не дают поверхностям трения слипаться друг с другом) и моющие присадки. *Композиционная* присадка объединяет в себе антиокислительную и диспергирующую.

Все присадки к смазочным материалам, так или иначе, представляют собой весьма активные химические вещества, каждое из которых оказывается способным влиять на эффективность и стабильность действия других присадок. Поэтому подбор пакета присадок представляет собой достаточно сложную проблему для сохранения их эффективности. И этому вопросу по содержанию подбора присадок и их концентрации придается большое значение при разработке новых смазочных материалов.

Появление смазочного материала в зоне трения изменяет свободную поверхностную энергию, форму контактирования трущихся тел, а также объёмные и граничные свойства в смазочном материале. Все эти факторы в основном определяют эффективность работы узла трения и могут компенсировать изменение реальной нагрузки, свойств материала и, по существу, конструкцию узла трения.

По способу нанесения смазочных материалов в зону трения твердых тел виды смазывания могут существенно отличаться друг от друга (рис. 10.6). Их выбор во многом определяется конструктивными возможностями при создании машины или механизма.



*Рис. 10.6. Способы нанесения смазочных материалов на поверхности трущихся тел*

### 10.3. Твердые смазочные материалы

В условиях, когда жидкие смазочные материалы не обеспечивают требованиям смазки узлов трения машин или оказываются непригодными для конкретных условий, используются твердые материалы, обладающие анизотропией (неоднородностью) механических свойств в разных направлениях и специфическими особенностями по температурному напряжению, уровню нагрузок, санитарным требованиям и др.

К твердым смазочным материалам относятся неорганические смазки – графит,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , BN, AgI и др.; известь, тальк, бентонитные глины; мягкие металлы – In, Pb, Sn, Ca, Zn, Ag и др.; пластмассы и полимеры – политетрафторэтилен (тефлон), нейлон, полиэтилен; порошкообразные и им подобные материалы.

*Дисульфид молибдена* – мягкий порошок серого цвета естественного или синтетического происхождения. Термически стабильный на воздухе в диапазоне температур до 300...400 °С, а в вакууме и инертных газах – до 1000...1500 °С.

*Графит* используется в виде спрессованных вкладышей к подшипникам, а также как наполнитель к пластичным смазкам. Графит обладает слоистой структурой и может быть термически стойким до температур порядка 400...600 °С. Для обеспечения низкого коэффициента трения графиту необходимо наличие молекул воды и кислорода.

*Политетрафторэтилен (тефлон)* – реализует низкий коэффициент трения, весьма стабилен по отношению к агрессивным средам. Работает в диапазоне температур от –200 до +300 °С. Для этого материала характерны также плохая теплопроводность, низкая износостойкость и неспособность выдерживать значительные нагрузки из-за высокой пластичности.

*Порошковые материалы* в зависимости от содержания в них влаги меняют свои структурно-реологические свойства от свойств, характерных для твердых тел, до свойств, близких к свойствам жидкостей.

### 10.4. Пластичные смазочные материалы

Выпуск пластичных смазочных материалов составляет в мире около 8% от производства всех смазочных материалов. Они представляют собой объемную дисперсную структуру (образованную из различного рода загустителей), в карманах которой находится дисперсионная фаза в виде масла. Агрегаты молекул размером в несколько мкм вместе

с маслом, на которое действуют межмолекулярные силы, образуют мицеллу. Взаимодействие между мицеллами приводит к образованию пространственного скелета. Прочность коллоидной структуры определяет эксплуатационную пригодность пластичной смазки. Реологические свойства масел характеризуются, прежде всего, вязкостью, которая зависит от температуры и давления. Для пластичных же смазок вязкость зависит не только от температуры и давления, но и от скорости сдвига. С ростом скорости сдвига вязкость пластичной смазки снижается, потому что разрушается внутренняя структура смазки.

Чаще всего в качестве загустителя используются мыла – соли жирных кислот (кальциевые, натриевые, литиевые, бариевые, калиевые, алюминиевые и свинцовые). В пластичной смазке загуститель находится в количестве 5...25 % от их массы. Вид катиона мыла определяет вид образуемой структуры и эксплуатационные свойства смазки. Вид же аниона мыла оказывает значительно меньшее влияние, чем вид катиона. Наибольший эффект достигается при использовании кислот с определенной длиной молекул, содержащих 14...18 атомов углерода. И этим определяются многие свойства пластичных смазок.

### **10.5. Газовые смазочные материалы**

Газовые смазочные материалы применяются чаще всего в высокооборотных машинах. В качестве смазочного материала используются реакционноспособные газы, инертные газы и аэрозоли жидких и твердых смазочных материалов.

В качестве инертных газовых смазок часто используется керосин, содержащий в качестве примеси не более 0,1...0,2 % серы и фосфора. Более эффективными оказываются газы, способные к образованию на поверхностях фрикционных пар поверхностных слоев, облегчающих частичное аварийное контактирование между трущимися телами.

Использование газовых смазочных материалов позволяет обеспечить наименьшие потери энергии при очень высоких частотах вращения трущихся тел (до 500000 мин<sup>-1</sup> и даже более) в широком диапазоне температур и давлений, а также в зонах с повышенной радиацией.

### **10.6. Целесообразность использования смазочных материалов**

На основании сведений об особенностях работы того или иного смазочного материала можно выявить определенные закономерности в целесообразности и надежности их использования.

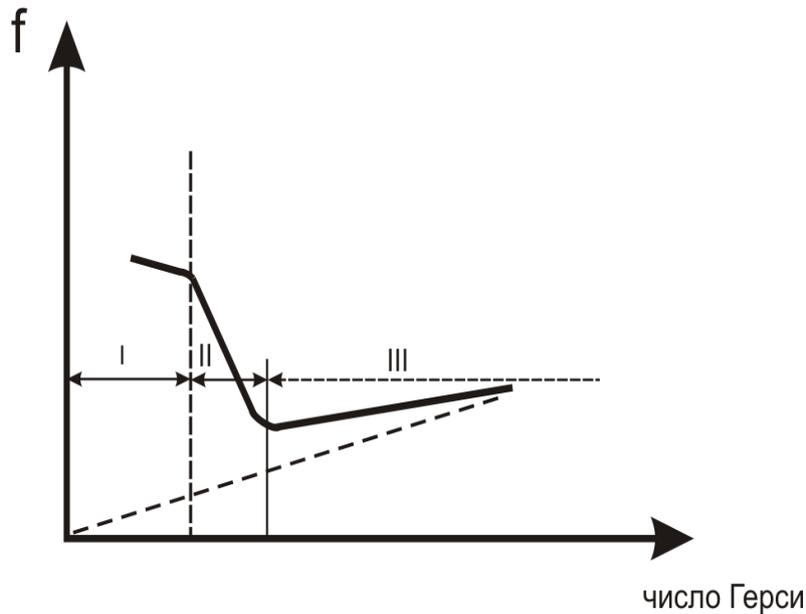


Рис. 10.7. Диаграмма Герси-Штрибека - зависимость коэффициента трения от безразмерного параметра числа Герси: I - зона граничной смазки; II - зона смешанной смазки; III - зона гидродинамической смазки

Зависимость уровня трения от количества смазочного материала, находящегося на поверхности трения, оценивается по диаграмме Герси (рис 10.7)

$$\varepsilon = \eta \cdot \frac{u}{P_{\text{пог}}},$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент Герси-Штрибека;  $u$  - скорость относительного перемещения трущихся тел;  $P_{\text{пог}}$  – погонная нагрузка на узел трения.

С увеличением коэффициента Герси-Штрибека существенно меняются реализуемые режимы трения. Область I соответствует положению, когда смазочного материала на поверхности трения чрезвычайно мало и между трущимися поверхностями реализуется сухое или близкое к нему трение. В области II реализуется граничное трение. Наиболее же низкое трение реализуется в условиях, когда на поверхностях трения образуются слои поверхностно-активных веществ, строго ориентированные друг относительно друга и со слабым сопротивлением скольжению по плоскостям их контактирования. В этом случае проявляются свойства неньютоновской вязкости смазочного материала (рис. 10.8).

С дальнейшим увеличением слоя жидкости в зоне трения (зона III) начинает реализовываться жидкостной режим трения, величина которого постепенно увеличивается по мере увеличения слоя смазочного материала на поверхностях трения.

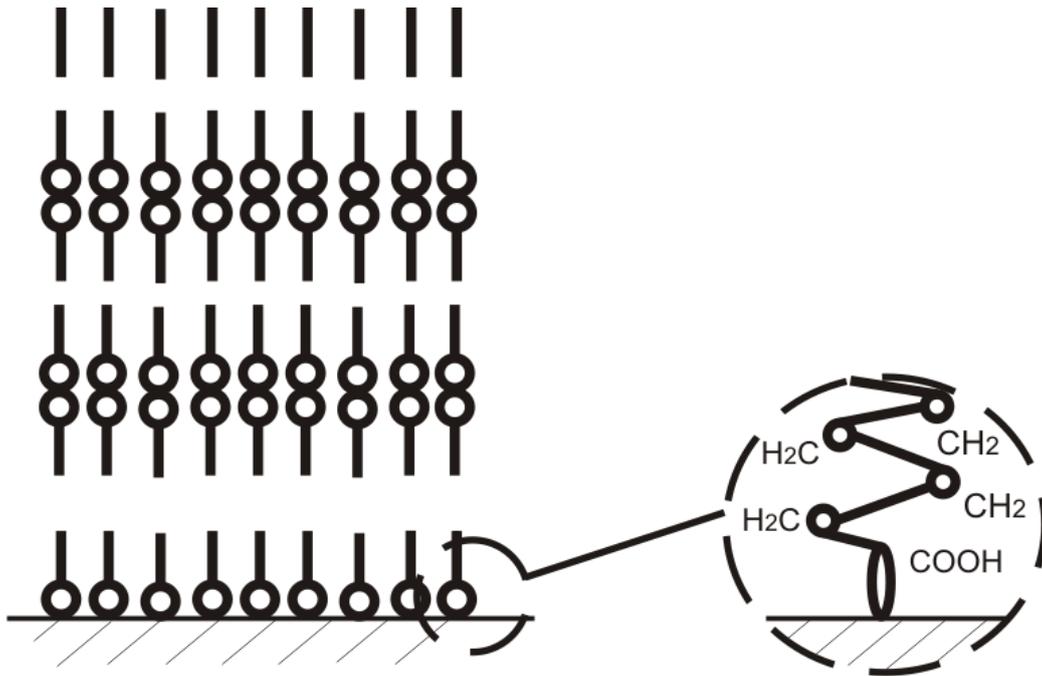


Рис 10.8. Структура граничного слоя на индивидуальной поверхности:  
I - полимолекулярный слой; II - мономолекулярный слой

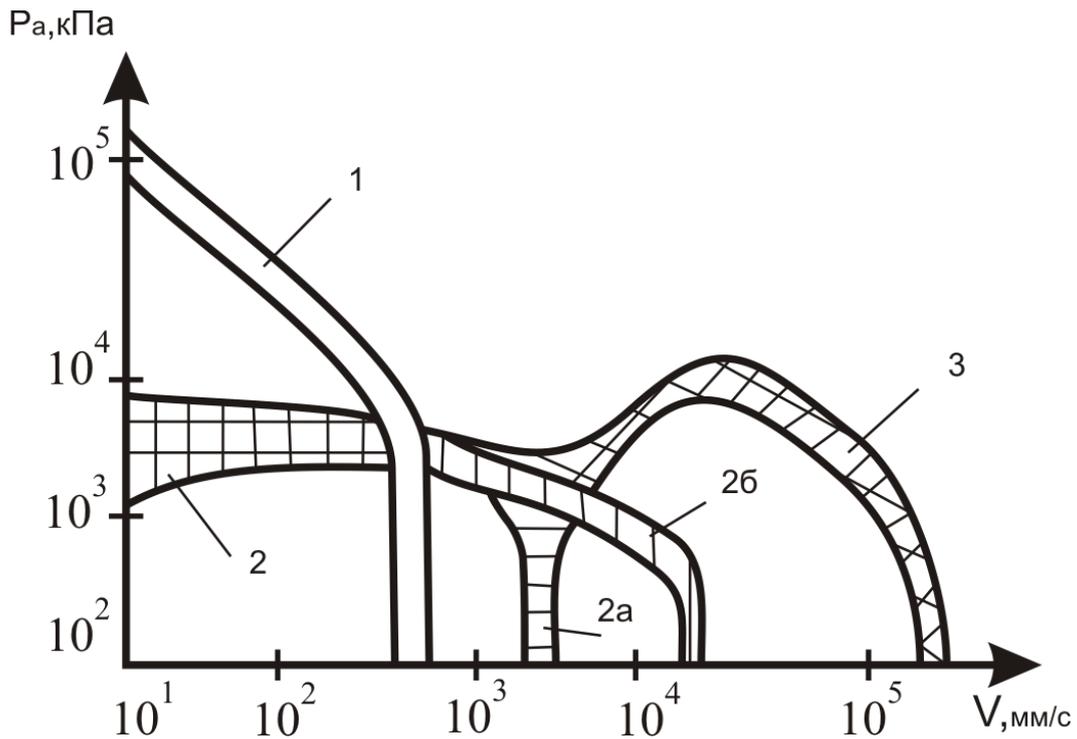


Рис. 10.9. Предельные значения скорости относительного перемещения трущихся тел и нормального давления в контакте для подшипниковых углов трения при использовании различных типов смазочных материалов по А.Р. Лансдауну: 1 - твердая смазка; 2 - пластичная смазка; 2а - для подшипников скольжения; 2б - для подшипников качения; 3 - масла

На рис. 10.10 показано изменение типа смазочного материала в зависимости от нагрузки и скорости относительного перемещения в узле трения.

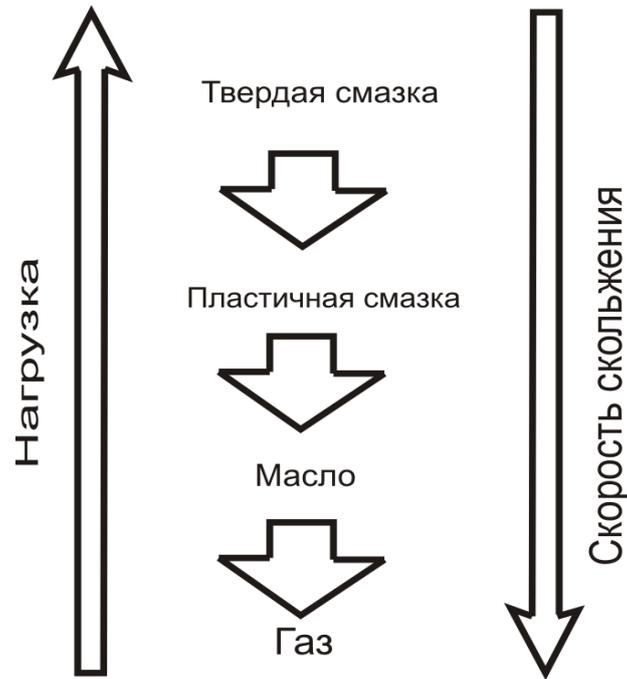


Рис. 10.10. Выбор типа смазочного материала по А.Р. Ландауну

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое третье тело и смазочный материал?
2. Каковы функции смазочного материала?
3. Что входит в состав смазочных материалов?
4. Какие существуют виды смазки?
5. Какие бывают жидкие смазочные материалы и присадки к ним?
6. Какие существуют виды смазывания?
7. Какие бывают твердые смазочные материалы?
8. Какие бывают пластичные смазочные материалы?
9. Какие бывают газовые смазочные материалы?
10. Каковы области целесообразности использования смазочных материалов (диаграмма Герси-Штрибека и А.Р. Ландауну)?

## Глава 11. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Выпуск машин трения общепромышленного назначения обычно осуществляют заводы, производящие испытательную технику (например, завод «Точприбор» в г. Иваново), но многие виды этих машин проектируются и изготавливаются в НИИ, вузах и на крупных предприятиях. Для этих же целей часто приспособляются путем переделок, иногда значительных, серийные машины трения, а также другие типы испытательного, металлорежущего и другого оборудования.

### 11.1. Классификация машин трения по силовым и кинематическим признакам

В зависимости от назначения машины трения можно условно разделить на две большие группы:

- 1) лабораторные машины для испытания материалов на трение и износ;
- 2) стенды для испытания узлов трения.

Классификация машин внутри каждой группы производится по определенным признакам. В испытательной технике в основу классификации положены силовые и кинематические признаки. Номера диапазонов по нагрузке и скорости могут быть различными. Конкретные модели машин дополнительно характеризуются комплексом устройств, обеспечивающих возможность проведения определенного вида испытаний (сменными зажимами, камерами, системами автоматизации). Классификация машин трения по кинематическим признакам приведена в табл. 11.1, а по динамическим признакам - в табл. 11.2. Кинематическая и силовая цепи считаются жесткими, если их параметры (соответственно перемещение образца и деформация нагружающей пружины  $y$ ) однозначно заданы.

Таблица 11.1

Типы машин трения по кинематическим признакам

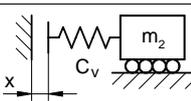
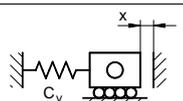
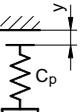
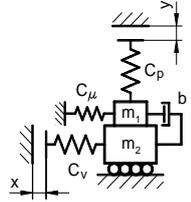
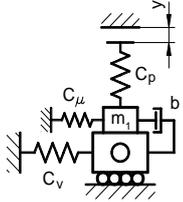
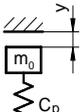
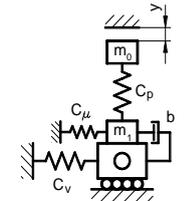
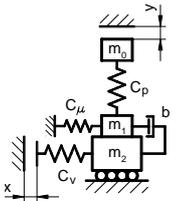
Классификационные признаки		Классы по характеру относительного движения образца	
Группа по характеру трения	Подгруппа по коэффициенту взаимного перекрытия (КВП)	I. Поступательное или вращательное движение	II. Возвратно-поступательное или возвратно-вращательное движение
1. Торцовое трение	а) $K_{B3} \approx 1$	I.1 а	II.1 а
	б) $K_{B3} \leq 1$	I.1 б	II.1 б
2. Трение по образующей	а) $K_{B3} \approx 1$	I.2 а	II.2 а
	б) $K_{B3} \leq 1$	I.2 б	II.2 б

Во многих случаях испытаниям на лабораторных машинах могут предшествовать физико-механические лабораторные испытания материалов, по результатам которых прогнозируются их фрикцион-

ные свойства. Важнейшей характеристикой при этом является твердость испытуемых материалов. В свою очередь, некоторые методы определения твердости, например, метод царапания, затухающих колебаний маятника непосредственно связаны с трибологией.

Таблица 11.2

Классификация машин трения по динамическим схемам

Классификационные признаки		Кинематическая цепь	
		 Жесткая	 Мягкая
Силовая цепь	 Жесткая	 Жесткая	 Полумягкая
	 Мягкая	 Полужесткая	 Мягкая

## 11.2. Общие представления о конструкции и технических характеристиках отечественных машин трения

Машина трения в общем случае включает в себя ряд функциональных узлов. Испытательный блок 1 (рис. 11.1) является основным узлом и предназначен для формирования испытуемой пары трения. Он должен обеспечивать точную и надежную установку образцов, однозначность и определенность в реализации расчетной схемы испытаний, включая равномерность нагрузки и износа образцов за счет их самоустанавливаемости или других мер. Соединения испытательного блока не должны иметь люфтов. Чаще всего должна обеспечиваться возможность испытаний различных типов и размеров образцов по нескольким схемам, т.е. универсальность с возможностью быстрой переналадки. Обычно в испытательный блок конструктивно входит датчик силы (момента) трения, являющийся частью системы измерения.

Привод 2 предназначен для сообщения движения одному или нескольким образцам, входящим в узел трения, и включает в себя элек-

тродвигатель и передаточный механизм, кинематика которого определяется характером относительного движения трущейся пары. Регулирование скорости в широких пределах осуществляется с помощью электропривода. Привод должен обеспечивать плавность движения, без рывков и ударов, если последние специально не предусмотрены методом. Узел нагружения 3 предназначен для создания постоянной или переменной нормальной нагрузки на образцы. Для этой цели используются рычажно-гравитационные, пружинные, пневматические и другие механизмы. При этом должны обеспечиваться плавное приложение и стабильность режима нагружения независимо от изменения в процессе испытаний силы трения и величины износа. Камера 4 служит для проведения испытаний в специальных температурных условиях, в вакууме, при подаче смазочного материала, абразива и т.д. Часто она выполняет также защитную функцию, ограждая оператора от воздействия продуктов износа, шума и других вредных факторов. Камеры могут быть герметизированы полностью или частично.

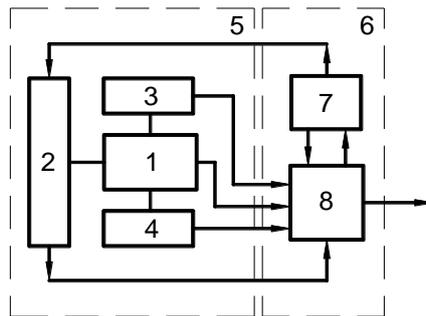


Рис. 11.1. Структурная схема машины трения

Указанные узлы обычно монтируются на общей станине, снабженной в необходимых случаях виброопорами. Конструкция должна обеспечивать надежную виброизоляцию машины, работающей в условиях интенсивных динамических нагрузок, в том числе путем установки на изолированный фундамент. Собственно машина трения 5 электрически связана с пультом 6, содержащим блоки управления 7 и измерения 8.

Однако в некоторых случаях электрооборудование размещается непосредственно в машине, т.е. специальный пульт отсутствует.

На машинах трения измеряются и регистрируются параметры, необходимые для получения полной информации о процессе трения: сила (момент) трения, сила нормального давления, скорость и путь трения, температура в заданной зоне, износ, работа трения, а при необходимости и другие параметры.

С целью повышения производительности испытаний и их достоверности на практике используется микропроцессорная вычислительная техника как для обработки данных по определенным программам, так и для управления режимом испытаний.

### 11.3. Отечественные серийные универсальные машины трения

Машина 2070 СМТ-1 может работать по схеме с замкнутым или открытым силовым контуром по трем кинематическим схемам (рис. 11.2, 11.3).

От электродвигателя 19 через шкив 1 и плоскозубчатую ременную передачу 5 вращение передается одновременно на верхний образец 13 через шкив 6 и на нижний 14 через шкив 3. Образец 13 установлен на валу 12 откидной каретки, внутри которой имеются шестерни 10 и 11. Каретка уравнивается пружинным механизмом 8. На валопроводе нижнего образца установлен упругий торсион датчика 7 момента трения с бесконтактным токосъемом, сигнал с которого выводится на пульт.

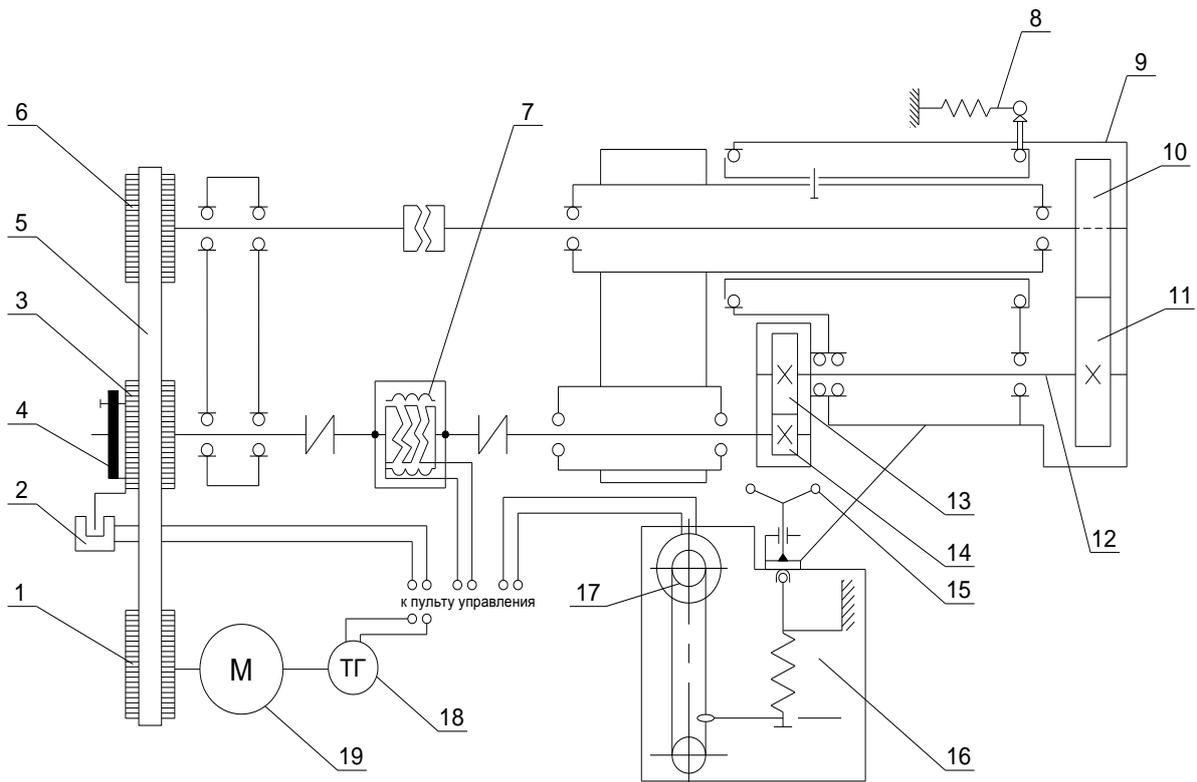


Рис. 11.2. Принципиальная схема машины трения 2070 СМТ-1

Нагружение образцов производится с помощью пружинного механизма 16. Величина нормальной силы регулируется поворотом рукоятки 15, а передача показаний на пульт осуществляется через гибкую связь от резистора 17.

Частота вращения измеряется с помощью тахогенератора 18 на валу двигателя 19, а число оборотов нижнего образца (путь трения) - с помощью бесконтактного датчика 2. Для защиты машины от перегрузок служит сменный предохранительный штифт 4.

При испытании пары вал-втулка работа происходит в специальной камере по схеме с открытым контуром. При этом каретка 9 откидывается и в таком положении фиксируется. Приборы, установленные на пульте, позволяют измерять момент трения, нагрузки, частоту вращения, путь трения и температуру в зоне трения.

Аналогичные машины выпускают фирмы Shimadzu (Япония) - тип Нишихара и Wolpert-Amsler (Германия) - тип А-135.

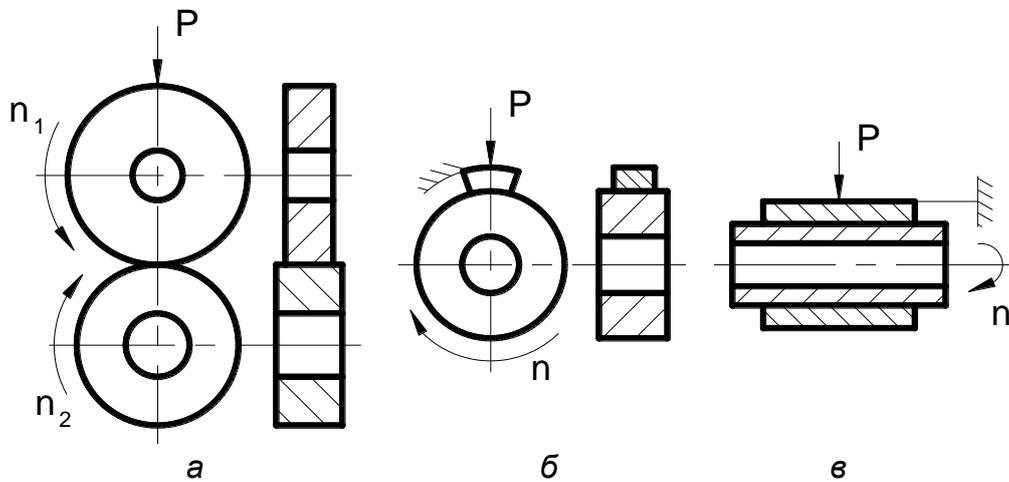


Рис. 11.3. Схемы испытаний на машине трения 2070 СМТ-1:  
а - ролик-ролик; б - диск-колодка; в - вал-втулка

Дальнейшим развитием машины трения 2070 СМТ-1 является модель ИИ-5018. Она состоит из испытательной установки и пульта измерения и выполнена в основном по той же схеме, но имеет более широкие возможности по режиму испытаний. Эти возможности таковы: частота вращения образца может плавно изменяться в интервале 50...2000 об/мин, а нормальная нагрузка - 100...5000 Н.

Универсальная машина трения УМТ-1 (рис. 11.4) при работе по одной из основных схем обеспечивает испытание образцов диск-палец. Эта машина трения была создана на базе известной машины трения И-47, которая проектировалась в середине 50-х годов XX века на базе ИМАШ РАН И.В. Крагельским и А.В. Чичинадзе. Машины трения УМТ-1 имеют четыре кинематические схемы испытаний образцов.

От электродвигателя 11 через клиноременную передачу получает вращение шпиндель редуктора 10, на котором закреплена планшайба 8,

предназначенная для установки на ней сменного контрообразца 7 типа диска. На валу 13 бабки 12 установлен диск 5, на котором под углом  $120^\circ$  и при фиксированном радиусе закрепляются три пальчиковых образца 6. Диск 5 связан посредством гибкой связи 4 с полым валом 3, взаимодействующим с упругим элементом силоизмерителя 2. Гибкая связь обеспечивает податливость в осевом направлении, т.е. возможность осевого перемещения диска 5 при износе образцов и его самоустанавливаемость, одновременно осуществляя безлюфтовую передачу крутящего момента трения.

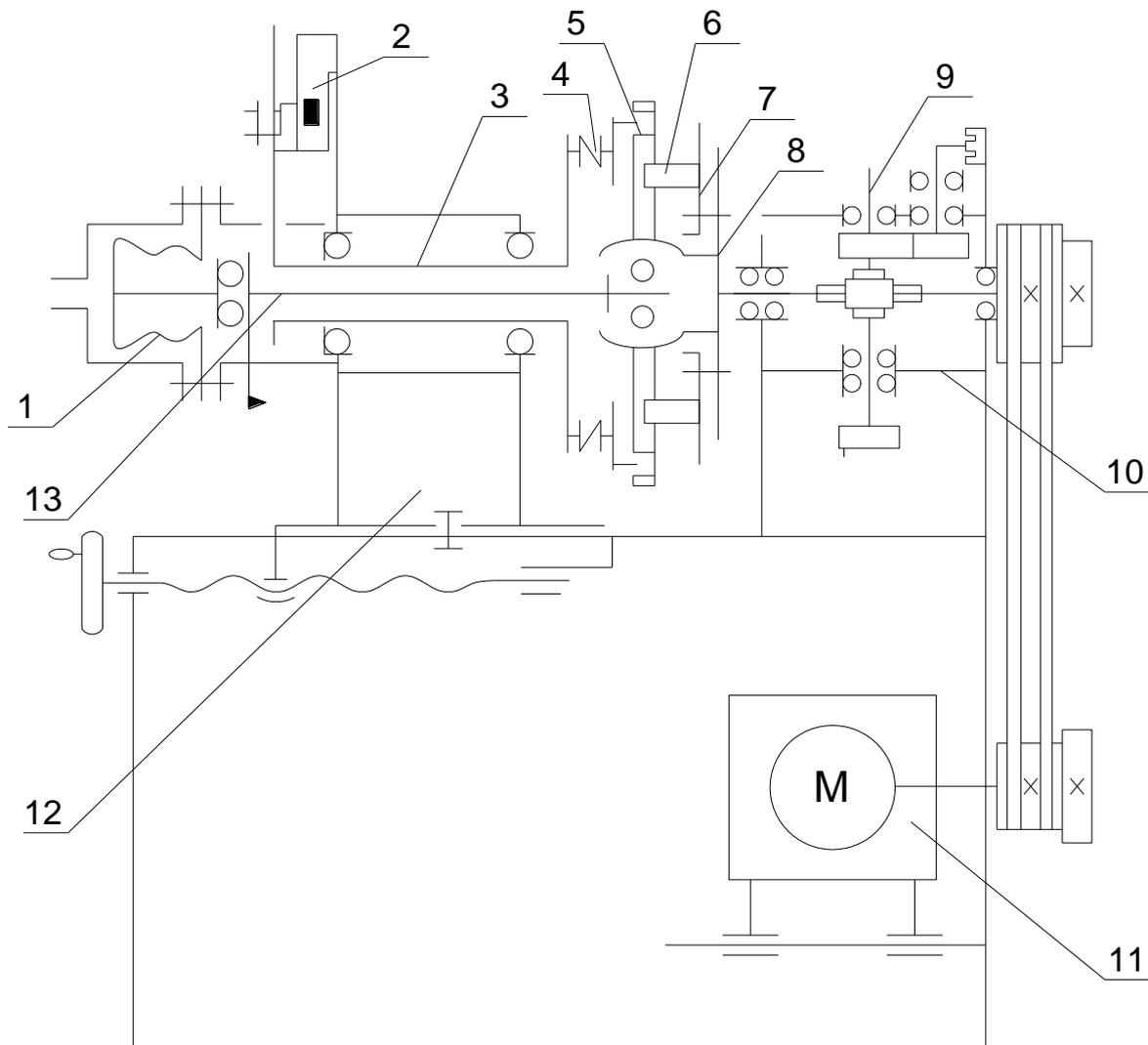


Рис. 11.4. Принципиальная схема универсальной машины трения УМТ-1

С помощью специального приспособления реализуется схема кольцо - кольцо. Съёмная камера позволяет проводить испытания образцов типа вал – втулка как при вращательном, так и при качательном движении вала. В последнем случае привод осуществляется от кривошипа, установленного на валу 9 редуктора 10.

Во всех случаях нагрузка на образцы создается автономным мембранным пневмомеханизмом 1. На пульте регистрируются в основном те же параметры, что и на машине 2070 СМТ-1.

Дальнейшим развитием машины трения УМТ-1 является модель УМТ-2168 «Унитриб» (рис. 11.5).

Она позволяет значительно расширить возможности испытаний, более удобна в работе и обслуживании (табл. 11.3).

Машины трения УМТ-1 и УМТ-2168 «Унитриб» были разработаны трибологами ИМАШ РАН и заводом «Точприбор» в г. Иваново.

Универсальная машина трения УМТ-2168 обеспечивает испытание образцов по всем восьми схемам и по этим особенностям не имеет аналога в мировой триботехнической испытательной практике. Кроме того, машина снабжена системой автономной капельной смазки образцов и может работать в комплексе с ЭВМ, обеспечивая обработку результатов по заданной программе, например расчет фрикционной теплостойкости.

Машина УМТ-2168 состоит из блока привода, испытательной установки и пульта измерения и управления. На пульте машины регистрируются момент трения, температура в зоне трения, измеряются частота вращения, путь трения, нормальное усилие прижима.

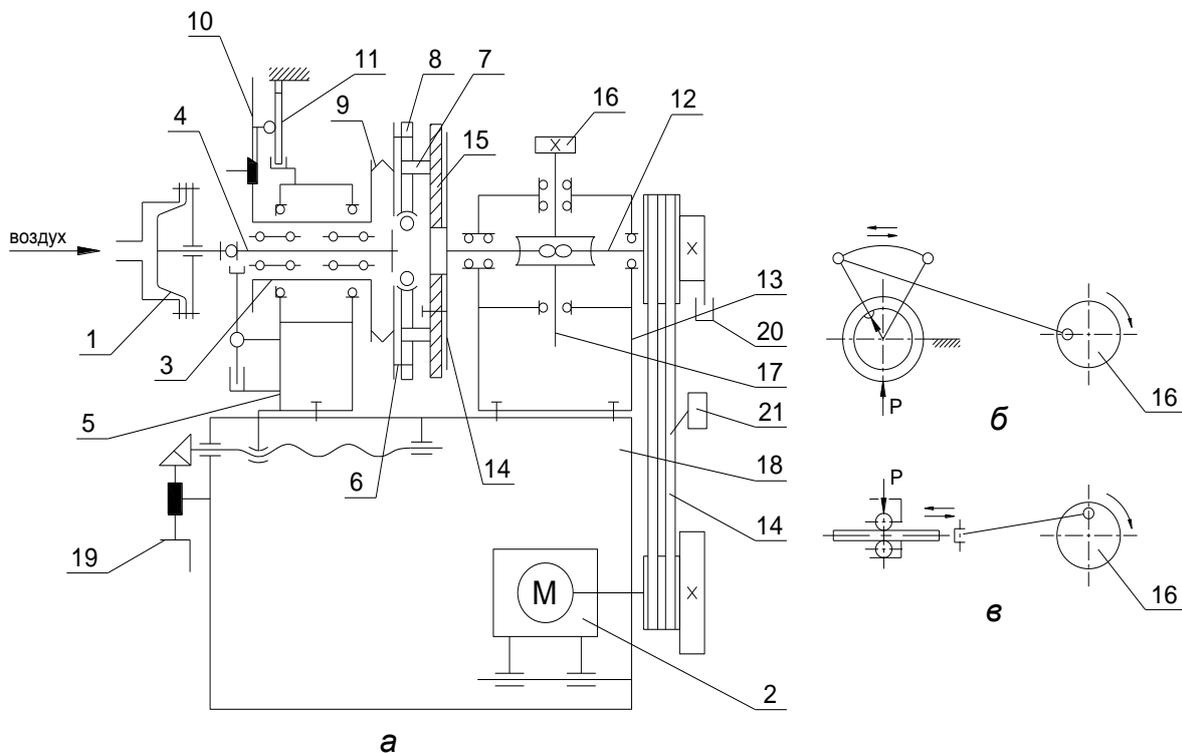
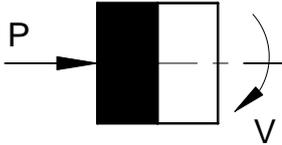
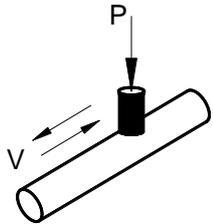
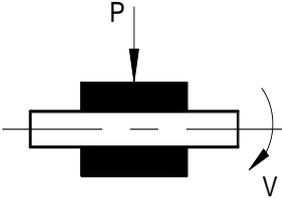
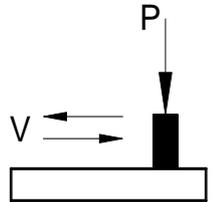
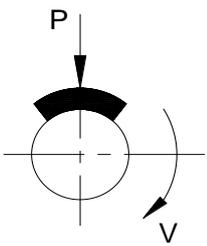
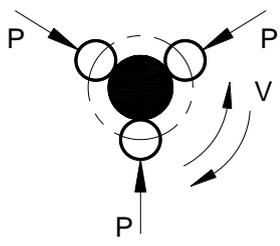
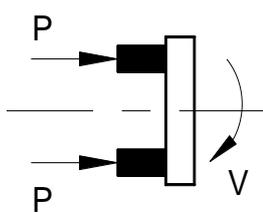
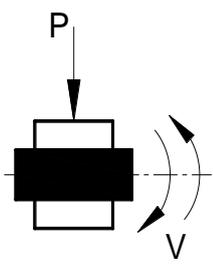


Рис. 11.5. Принципиальная схема универсальной машины трения УМТ-2168 «Унитриб»: а - общая схема; б - схема испытаний при качательном движении; в - при возвратно-поступательном движении

Схемы испытаний на машинах трения УМТ-1 и УМТ-2168 «Унитриб»

Серийный узел трения (поступательное движение)	Модель на УМТ-1	Серийный узел трения (возвратно-поступательное движение)	Модель на УМТ-2168 «Унитриб»
Дисковый тормоз, муфта, упорный подшипник $K_{ВЗ} \approx 1; K_{ВЗ} < 1$		Шарнир $K_{ВЗ} = 1$	
Подшипник скольжения $K_{ВЗ} \approx 1; K_{ВЗ} < 1$		Пучок труб теплообменника $K_{ВЗ} \ll 1$	
Тормоз вагона, подъемного крана $K_{ВЗ} < 1$		Опоры и направляющие скольжения $K_{ВЗ} \ll 1; K_{ВЗ} \rightarrow 0$	
Трение при сравнительно высоких скоростях $K_{ВЗ} < 1; K_{ВЗ} \ll 1$		Любые узлы при высоких контактных давлениях $K_{ВЗ} \ll 1; K_{ВЗ} \rightarrow 0$	

В корпусе 5 в подшипниках установлен полый вал 3, внутри которого проходит шток 4. Диск 8 установлен на штоке 4 шарнирно и через кольцо 6 и гибкую связь 9 связан с валом 3, который через рычаг 10 воздействует на упругий элемент 11 силоизмерителя. Осевая нагрузка передается от мембранного пневмопривода 1 штоку 4 и диску 8. Трубки 2 служат для охлаждения через внутренние каналы диска 8 водой. На диске устанавливаются пальчиковые образцы 7 или камеры с приспособлениями для испытания пар трения при вращательном движении. При этом диск 8 может жестко соединяться с кольцом 6.

С помощью специальных приспособлений реализуются другие схемы испытаний. Съёмная камера позволяет проводить испытания образцов типа вал-втулка как при вращательном, так и при качательном движении вала. В этих случаях привод осуществляется от кривошипа 16, установленного на валу 17 редуктора 13. Во всех случаях нагрузка на образцы создается автономным мембранным пневмомеханизмом 1.

Подвод образцов осуществляется перемещением корпуса 5 задней бабки по станине 18 путем вращения рукоятки 19. Для измерения суммарного числа оборотов диска 14 (путь трения) служит датчик 20. Переключение скоростных диапазонов реализуется с помощью датчика 21.

#### **11.4. Методы трибологических испытаний**

Для ускоренной экспериментальной оценки работоспособности и фрикционно-износных характеристик по результатам, полученным на малогабаритных образцах и в натуральных трибосопряжениях, комплексно применяют ряд методов, существенно отличающихся друг от друга и не позволяющих порознь получить полное представление о работоспособности пары трения.

Наиболее эффективным является комплексное применение модельных и натуральных испытаний, объединенных в общую, иерархическую структуру, получившую название рационального цикла испытаний (табл. 11.4). Следует иметь в виду, что типовые узлы трения представляют собой также сложную иерархическую систему. При испытании такой системы и выборе показателей ее эффективности необходимо характеризовать не какую-либо часть системы или отдельные элементы, а именно систему как единое целое и обеспечить возможность получения количественной оценки с требуемой достоверностью.

Последняя обеспечивается использованием материалов одной партии на всех этапах рационального цикла испытаний (РЦИ), назначением объема контролируемой выборки, погрешности измерения в соответствии с рекомендациями математической статистики для того или иного вида распределения (как правило, нормального).

Элементы пары трения контактируют друг с другом, рабочей и окружающими средами, причем некоторые из этих сред могут быть химически активными или проявлять свойства катализаторов химических процессов.

Пригодность материалов для работы в условиях взаимного контакта без задигов, схватывания и т.п. называют совместимостью. При хорошей совместимости изменение свойств материалов вследствие контакта со средами за период расчетного ресурса должно происходить в заданных пределах. Совместимость оценивается на основании комплекса физико-механических испытаний, в число которых входит и РЦИ. В некоторых отраслях триботехники принята оценка в баллах, в других - в виде классов износостойкости.

Таблица 11.4

## Рациональный цикл испытаний пар трения для трибосопряжений

№ этапов	Назначение	Содержание	Получаемые зависимости
1	2	3	4
0	Подбор сочетаний материалов на основании априорной информации	Оценка по критериям коррозионной стойкости и отсутствию схватывания	-
1а	Выявление границ совместимости пары трения по определяющему параметру при комнатной температуре окружающей среды	Получение фрикционно-износных характеристик при вариации нагрузки или температуры фрикционного разогрева при комнатной температуре окружающей среды	$f = \psi_{a1}(P)$ $f = \psi_{a2}(v)$ $l = \psi_{a1}(P)$ $l = \psi_{a2}(v)$
1б	То же, при повышенных и отрицательных температурах окружающей среды	То же, при повышенных и отрицательных температурах	$f = \psi_{61}(P)$ $f = \psi_{62}(v)$ $l = \psi_{61}(P)$ $l = \psi_{62}(v)$
1в	То же, при высокой влажности	То же, в среде высокой влажности	$f = \psi_{в1}(P)$ $f = \psi_{в2}(v)$ $l = \psi_{в1}(P)$ $l = \psi_{в2}(v)$
1г	То же, при радиационных воздействиях	Получение фрикционно-износных характеристик при дополнительных радиационных	$f = \psi_{r1}(P)$ $f = \psi_{r2}(v)$ $l = \psi_{r1}(P)$ $l = \psi_{r2}(v)$
1д	То же, при вибрационных воздействиях	То же, при вибрационном воздействии в заданном диапазоне частот	$f = \psi_{д1}(P)$ $f = \psi_{д2}(v)$ $l = \psi_{д1}(P)$ $l = \psi_{д2}(v)$

1	2	3	4
2а	Моделирование на образцах условий работы трибосопряжений при комнатной температуре окружающей	Расчет и воспроизведение на малогабаритных образцах температурно-силовых полей такой же интенсивности, как и в натуральных трибосопряжениях	$f_{мга} = f_{нга} \cdot C_{г1,2}^{\alpha 1}$ $l_{мга} = l_{нга} \cdot C_{г1,2}^{\beta 1}$
2б	То же, при повышенных или отрицательных температурах окружающей среды	То же, при экстремальных температурных условиях	$f_{мгб} = f_{нгб} \cdot C_{г1,2}^{\alpha 1}$ $l_{мгб} = l_{нгб} \cdot C_{г1,2}^{\beta 1}$
2в	Моделирование процесса трещинообразования	Расчет и воспроизведение на малогабаритных образцах градиентов температуры и напряжений таких же, как и в натуральном трибосопряжении	$f_{мгв} = f_{нгв} \cdot C_{г1,2}^{\delta 1}$ $l_{мгв} = l_{нгв} \cdot C_{г1,2}^{\delta 1}$
2г	Моделирование условий работы трибосопряжения при вибрационном воздействии	То же, что в 2а или 2в, но при вибрационных воздействиях	$f_{м1г} = f_{н1г} \cdot C_{г1,2}^{\alpha 1}$ $f_{м2г} = l_{н2г} \cdot C_{г1,2}^{\delta 1}$ $l_{м1г} = f_{н1г} \cdot C_{г1,2}^{\beta 1}$ $l_{м2г} = l_{н2г} \cdot C_{г1,2}^{\nu 1}$
3а	Натурное моделирование в типовых условиях эксплуатации	Оценка влияния на фрикционно-износные характеристики пары трения конструкции трибосопряжения	$f_{нм} = f_{н}^{\pm \Delta}$ $l_{нм} = f_{н}^{\pm \Delta}$
3б	Натурное моделирование на стенде экстремальных условий работы трибосопряжения	-	-
4а	Натурное моделирование в типовых условия эксплуатации	Оценка влияния на работоспособность трибосопряжения конструкции машины	$f_{эм} = f_{н}^{\pm \Delta}$ $l_{эм} = f_{н}^{\pm \Delta}$
4б	Натурное моделирование в экстремальных условиях эксплуатации	Оценка гарантированной эксплуатационной надежности трибосопряжения	-

*Испытания на фрикционную теплостойкость.* Обязательным этапом РЦИ является выявление границ совместимости пары трения, оценка ее фрикционно-износных характеристик применительно к режимам эксплуатации исследуемого узла трения в лабораторных условиях и определение на основании этих испытаний критических точек. Обычно в качестве определяющего параметра назначается либо нагрузка, либо температура трения в сочетании с нагрузкой. Так, метод экспериментальной оценки коэффициента трения и интенсивности изнашивания материалов при их фрикционном разогреве получил название фрикционной теплостойкости. Сущность этого стандартизированного метода

заключается в том, что вращающийся и неподвижный кольцевые образцы (наружный диаметр образца 28 мм, внутренний 20 мм, высота 15 мм) исследуемого сочетания материалом устанавливают соосно, прижимают друг к другу торцовыми рабочими поверхностями с заданным осевым усилием, ступенчато изменяют температуру фрикционного разогрева путем дискретного изменения частоты вращения подвижного образца и определяют значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения для каждой ступени температуры фрикционного разогрева, а о фрикционной теплостойкости материалов судят по зависимости значений этих величин от температуры.

*Модельные испытания на малогабаритных образцах.* Этим испытаниям предшествует определение масштабного фактора или расчет масштабных коэффициентов перехода (МКП) от модели к натуре для каждого параметра триботехнической системы. При этом значения сомножителей в формуле МКП зависят от дополнительных условий (например, тождественности значений температуры у модели и натуре). Такие условия позволяют применять сжатый, растянутый или нормальный масштабы времени и выполнять моделирование при ускоренных испытаниях. После расчета МКП обязательно выполняется анализ возможности их реализации при испытаниях на лабораторных установках по параметрам режима испытаний: скорости, нагрузке и температуре. В ходе анализа используется симплекс геометрических размеров

$$C_r = \frac{A_{ам1} \cdot A_{ам2} \cdot S_{н1} \cdot S_{н2}}{A_{ан1} \cdot A_{ан2} \cdot S_{м1} \cdot S_{м2}},$$

где  $A_{ам1}$  и  $A_{ам2}$  - номинальные площади контакта элементов пары трения модели;  $A_{ан1}$  и  $A_{ан2}$  - номинальные площади контакта элементов пары трения в натуральную величину;  $S_i$  - характерные размеры элементов в виде отношения свободной поверхности к объему.

Для нестационарных процессов учитывается только часть элемента пары трения, ограниченная эффективной глубиной проникновения тепла  $b_{эф}$ . Из формулы видно, что значения  $C_e$  можно варьировать, изменяя размеры модельных образцов.

В качестве примера рассмотрим один из стандартных методов модельных испытаний - теплоимпульсный метод экспериментальной оценки триботехнических характеристик материалов фрикционных уст-

ройств (фрикционных муфт и тормозов) одностороннего трения. Этот метод моделирует условия нагружения данных устройств в режиме импульсного теплофрикционного воздействия. Сущность метода заключается в том, что на валу испытательного прибора устанавливают кольцевой образец и маховые массы с определенным по расчету моментом инерции, вал приводят во вращение с определенной частотой, отключают привод вала, прижимают с заданным усилием к торцевой поверхности вращающегося образца неподвижно установленный кольцевой образец, осуществляя торможение. В процессе торможения непрерывно регистрируют момент сил трения, продолжительность торможения, температуру в зоне фрикционного контакта, количество оборотов вала, а после торможения - износ образцов, по значениям которых судят о триботехнических характеристиках испытываемых материалов. Параметры режима испытаний задают исходя из условий эксплуатации фрикционного устройства, для которого предназначены испытываемые материалы.

*Стендовые и натурные испытания.* Для определения влияния конструктивного оформления пары трения в заданном диапазоне режимов силового, теплового и скоростного нагружения на работоспособность трибосопряжения применяют стендовые и натурные испытания. Простейшим способом проведения натуральных испытаний является использование машины с установленным в ней трибосопряжением. Однако в этом случае через некоторое время после начала испытаний можно фиксировать лишь немногие показатели работы конструкции - в основном износ. Машина во время этих испытаний работает в лаборатории при усредненных значениях режимов, иногда существенно отличающихся от их экстремальных значений в эксплуатации. Поэтому такие натурные испытания непосредственно на машине малоэффективны и должны применяться сравнительно редко. Обычно имеет место натурное моделирование, выполняемое на специальных стендах, позволяющих воспроизводить и регистрировать режимы нагружения при большей вариации значений контрольных параметров, непрерывно замерять и регистрировать значения момента сил трения, коэффициента трения, температуры, расхода смазочного материала, а периодически - изменение качества и размеров контактирующих поверхностей и износа. Стендовые испытания часто управляются ЭВМ по специальным программам. При стендовых испытаниях выявляется, каким обра-

зом конструктивное оформление трибосопряжения оказывает влияние на фрикционно-износные характеристики пары трения и соответствие этих характеристик техническим условиям на пару трения.

*Эксплуатационные испытания.* Как известно, эксплуатационными испытаниями (ЭИ) называют испытания объектов, проводимые при эксплуатации. По назначению, условиям эксплуатации и конструктивному оформлению объекты испытаний весьма разнообразны. Их применяют в шахтах, под водой, на большой высоте при вакууме, в агрессивных средах, при высоких и низких температурах, различных значениях влажности и запыленности. На объекты оказывают влияние магнитные поля, вибрации, случайные перегрузки, перегрузки вследствие деформации сопряженных элементов и др. Особенностью ЭИ является стохастический характер большинства действующих параметров нагружения. Как правило, при испытаниях, предшествующих ЭИ (в терминологии теории надежности это автономные лабораторные, исследовательские, доводочные, натурные испытания), в полной мере не удается учесть этот характер, особенно если рассматривать совокупность параметров. Вместе с тем, учитывая значительное количество узлов трения в большинстве машин, малые габариты и стесненную компоновку этих узлов, не представляется, как правило, возможным выполнять при ЭИ замеры силы трения и температуры каждого из узлов, а замеры износа, как правило, требуют периодической разборки трибосопряжения. Управление испытанием во многих отраслях техники автоматизировано и включает в себя операции, связанные с обработкой информации, получаемой при испытании, расчетом показателей качества и их оптимизацией. Этот процесс является, по существу, процессом управления автоматизированным экспериментом, поэтому при проведении ЭИ используют ЭВМ с комплектом прикладных программ. Статистическая обработка экспериментальной информации позволяет оценить износные характеристики, а также вычислить математическое ожидание и дисперсию полученных величин, составить уравнение регрессии для ввода информации в базу данных.

После завершения рационального цикла испытаний анализируют результаты всех этапов. После введения коэффициентов запаса полученная информация применяется для прогнозирования надежности отдельных узлов и машины в целом.

Рассмотренный РЦИ наиболее эффективен при разработке принципиально новых конструкций машин и модернизации крупных машин. В первом случае на стадии проектирования машины удастся разработать трибосопряжения, обеспечивающие заданный ресурс. Во втором случае возможны существенная экономия материалов за счет того, что модельные образцы малогабаритны и сокращение времени, необходимого для подготовки эксперимента, связанного с монтажом и демонтажем узла трения. В результате экономический эффект при сопоставлении вариантов, когда в качестве основных испытаний назначаются лабораторные или эксплуатационные, складывается из экономии материалов, сокращения затрат на монтаж и демонтаж трибосопряжения, уменьшения численности обслуживающего персонала и, самое главное, простоев машины в период эксплуатации в связи с ремонтами.

### 11.5. Переносные устройства для измерения коэффициента трения

Для измерения коэффициента трения используют специальные приборы - трибометры. Конструкция трибометра для транспорта должна отвечать определенным требованиям. В силу специфики проведения испытаний в реальных эксплуатационных условиях трибометр должен работать в автоматическом и полуавтоматическом режимах, требовать как можно меньше времени на подготовку и проведение измерения трения, а также, что немаловажно, необходимо, чтобы условия его контактирования соответствовали реальным условиям контакта колеса.

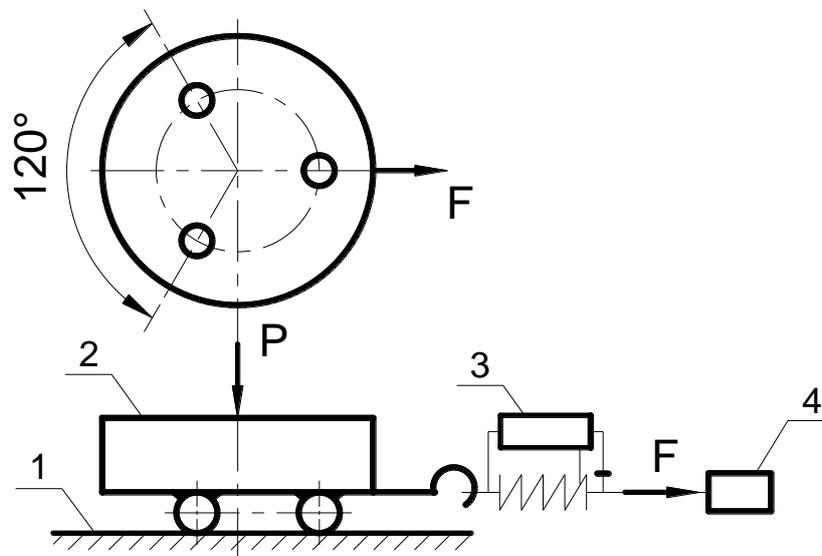


Рис. 11.6. Общий вид и измерительный ползунок шарикового трибометра:  
1 – рельс; 2 – ползунок; 3 – динамометр; 4 – подающий механизм

Из существующих разновидностей трибометров по принципу действия можно выделить шариковые и роликовые. Оба типа трибометров моделируют фрикционный контакт между колесом и рельсом методом создания в зоне касания своего измерительного элемента и поверхности, на которой измеряется трение, давления идентичного реальному контакту колеса с рельсом. Шариковый трибометр (рис. 11.6) состоит из груза, к которому прикреплены три шарообразные опоры, создающие точки контакта определённой площади.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Какова классификация машин трения для лабораторных и стендовых испытаний?
2. Каковы общие представления о конструкциях и технических характеристиках машин?
3. Какие существуют методы триботехнических испытаний?
4. Что такое испытание на фрикционную теплостойкость?
5. Каковы стендовые, натуральные и переносные смоделированные устройства для измерения сил трения в эксплуатационных условиях?

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Основы трибологии: учебник [для вузов]; под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Центр «Наука и Техника», 1995. - 778 с.
2. Основы трибологии; под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. - 663 с.
3. Трение, износ и смазка. Трибология и триботехника; под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 575 с.
4. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
5. Дерягин, Б.В. Что такое трение? / Б.В. Дерягин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 230 с.
6. Боуден, Ф.П. Трение и смазка / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. - М.: Машгиз, 1980. - 181 с.
7. Справочник по триботехнике; под ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, Варшава ВКЛ, том 1, 1989. - 400 с; том 2, 1990. - 420 с; том 3, 1992. - 730 с.
8. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОТЕХНИКА.....	4
1.1. Основные понятия .....	4
1.2. Роль трения в работе машин и оборудования и основные задачи триботехники.....	6
Вопросы для самоконтроля .....	10
2. ВИДЫ И РЕЖИМЫ ТРЕНИЯ .....	10
2.1. Классификация трения .....	10
Вопросы для самоконтроля.....	17
3. ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ .....	17
Вопросы для самоконтроля.....	29
4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВА ТРУЩИХСЯ ТЕЛ.....	30
4.1. Характер взаимодействия между атомами, ионами и молекулами .....	30
4.2. Кристаллические и аморфные тела .....	34
4.3. Монокристаллы и поликристаллы. Элементарная кристаллическая ячейка .....	35
4.4. Теоретическая и реальная прочность твердых тел. Дефекты структуры.....	36
4.5. Рельеф поверхности твердых тел.....	39
4.6. Микродефекты поверхности. Внешняя и внутренняя поверхность твердого тела .....	41
4.7. Физико-химические свойства поверхностей трения твердых тел. Свободная поверхностная энергия твердых тел. Адсорбция .....	42
Вопросы для самоконтроля.....	44
5. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ .....	45
5.1. Контактное взаимодействие гладких поверхностей твердых тел.....	45
5.2. Адгезионное взаимодействие между твердыми телами.....	47
5.3. Типы фрикционных связей .....	48
5.4. Развитие усталостных трещин при трении.....	49
5.5. Работа трения. Температура на поверхностях трения .....	51
5.6. Химическое модифицирование поверхности.....	53

5.7. Эффект П.А. Ребиндера .....	54
5.8. Угол смачивания поверхности твердого тела .....	56
5.9. Особенности трения твердых тел.....	57
5.10. Влияние окисных, адсорбционных и других поверхностных пленок на трение твердых тел.....	60
5.11. Обобщенные закономерности трения твердых тел .....	69
Вопросы для самоконтроля .....	71
6. ИЗНАШИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	71
6.1. Общие понятия и определения.....	71
6.2. Классы износостойкости .....	72
6.3. Входные и выходные параметры и внутренние факторы, определяющие износ .....	73
Вопросы для самоконтроля.....	75
7. МЕХАНИЗМЫ И ОСОБЕННОСТИ ВИДОВ ИЗНАШИВАНИЯ.....	75
7.1. Механические виды изнашивания.....	76
7.2. Молекулярно-механические виды изнашивания .....	79
7.3. Коррозионно-механические виды изнашивания .....	81
7.4. Переход одних видов изнашивания в другие.....	85
7.5. Адсорбционное понижение прочности трущихся тел.....	87
Вопросы для самоконтроля.....	88
8. ТРИ СТАДИИ ИЗНАШИВАНИЯ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ .....	89
8.1. Распределение износа между трущимися телами по их рабочим поверхностям.....	93
Вопросы для самоконтроля.....	95
9. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗНАШИВАНИЯ .....	95
9.1. Общие закономерности измерения силы трения и скорости изнашивания в зависимости от условий нагружения .....	97
9.2. Понятие износостойких и неизносостойких материалов.....	100
9.3. Основные направления совершенствования триботехнических свойств подшипников скольжения и качения .....	101
Вопросы для самоконтроля.....	103
10. СМАЗКА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	104
10.1. Основные понятия и определения .....	104
10.2. Жидкие смазочные материалы.....	106

10.3. Твердые смазочные материалы .....	111
10.4. Пластичные смазочные материалы .....	111
10.5. Газовые смазочные материалы.....	112
10.6. Целесообразность использования смазочных материалов .....	112
Вопросы для самоконтроля.....	115
11. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	115
11.1. Классификация машин трения по силовым и кинематическим признакам.....	116
11.2. Общие представления о конструкции и технических характеристиках отечественных машин трения .....	117
11.3. Отечественные серийные универсальные машины трения.....	119
11.4. Методы трибологических испытаний .....	124
11.5. Переносные устройства для измерения коэффициента трения.....	130
Вопросы для самоконтроля.....	131
ЛИТЕРАТУРА .....	132

Учебное издание

**ЛУЖНОВ** Юрий Михайлович  
**АЛЕКСАНДРОВ** Виктор Дмитриевич

## **ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ**

Учебное пособие

*Редактор* Н.П. Лапина  
*Компьютерная верстка* А.В. Любезнова, М.А. Марков

Подписано в печать 19.02.2013 г.  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Ариал». Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 6,8.  
Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_  
Цена 136 руб.

Отпечатано на ротапринте МАДИ.  
125319, Москва, Ленинградский проспект, 64