

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

С. Н. СОЛОВЬЕВ, С. Ж. БОДУ, Е. В. ТРОФИМОВА

ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Под общей редакцией С.Н. Соловьева

Рекомендовано Ученым советом НУК

Николаев ♦ НУК ♦ 2018

УДК 621.891(075)

С 60

Авторы: С. Н. Соловьев, кандидат технических наук, профессор;

С. Ж. Боду, ст. преподаватель;

Е. В. Трофимова, ст. преподаватель

Рецензенты: Б. Г. Тимошевский, доктор технических наук, профессор;

М. Р. Ткач, доктор технических наук, профессор; А. П. Шуми-

лов, кандидат технических наук, профессор НУК

Рекомендовано Ученым советом НУК

(протокол № 3 от 27.03.2018 г.)

Соловьев С. Н.

С 60 Основы триботехнологии : учебное пособие / С. Н. Соловьев, С. Ж. Боду, Е. В. Трофимова ; под общ. ред. С. Н. Соловьева. – Николаев : НУК, 2018. – 236 с.

ISBN 000–000–000–000–0

В учебном пособии изложены сведения о теоретических и экспериментальных основах трения, изнашивания и смазки с позиций нового научно-технического направления – триботехнологии машиностроения. Сформулированы основные положения и принципы триботехнологии, изложена методология отработки изделий на триботехнологичность. Особое внимание уделено ряду практических методов решения триботехнологических задач, в том числе конструкторским методам и технологическим процессам создания триботехнологического качества рабочих поверхностей и контактов пар трения.

Для студентов, аспирантов, инженеров, занимающихся изучением, разработкой, изготовлением и эксплуатацией машин.

УДК 621.891(075)

© Соловьев С.Н., Боду С.Ж.,

Трофимова Е.В., 2018

© Национальный университет кораблестроения

ISBN 000–000–000–000–0

имени адмирала Макарова, 2018

Предисловие

Техника – обобщающее наименование технических средств. Понятие техники охватывает технические изделия, ранее не существовавшие в природе и изготовленные человеком для осуществления какой-либо деятельности: машины, механизмы, оборудование, аппараты, приспособления, инструменты, приборы и т. д., а также системы взаимосвязанных технических устройств.

С точки зрения управления процессами, техника является средством реализации задач и достижения целей процесса.

С позиций приведенного определения, *триботехника* – это изделия, узлы и входящие в них детали, необходимые для осуществления функционирования механической системы.

Функционирование механических частей машины осуществляется путем контактирования и взаимного относительного движения сопрягаемых тел по заданным законам кинематики и динамики в условиях трения.

Создание таких технических средств – триботехники – осуществляется по технологиям проектирования, производства и эксплуатации.

Причем технологии проектирования носят виртуально-образный, расчетный характер. Технологии изготовления и эксплуатации – в основном реальный. Получение оптимальной пары трения, безусловно, зависит от качества проектных технологий и знаний конструктора. Однако в конечном итоге эта оптимальность зависит от качества производственных технологий, от знаний технолога и умений исполнителей технологий.

Предварять приведенные выше технологии, естественно, должна наука о трении, износе и смазке, которая называется *трибологией*.

Отсюда логично вытекает идея необходимости объединения трибологии и технологии в один научно-проектно-технологический комплекс на единой методологии, целевой функцией которой является создание оптимальной триботехники.

Такое научное направление было предложено в 1981 году с названием «**Триботехнология**». Оно медленно, но последовательно завоевывает свое право на существование. За это время издан ряд монографий, учебных пособий, множество научных статей, проведены международные научные конференции.

Вместе с тем к настоящему моменту в научной и технической литературе значительно чаще используется традиционный термин «Триботехника» – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин.

Оба термина (триботехника и триботехнология) поэтому могут использоваться равнозначно с учетом различных акцентов. **Триботехника** делает акцент на проектировании трибосопряжений, тогда как **триботехнология** – на процессы их изготовления. Учитывая то обстоятельство, что причины возникновения отказов в большей степени относятся к технологической области жизненного цикла изделия, термин «триботехнология» предпочтительнее, так как ориентирует инженера на повышенное внимание к реальным процессам создания триботехники.

К слову, термин «Триботехника» отсутствует в «Большой советской энциклопедии». За рубежом он тоже редко используется, там чаще встречается термин «Трибология» или «Трибоника».

Авторы данного учебного пособия – апологеты «Триботехнологии», хотя ничего не имеют против, если студенты будут постигать знания о трении, износе и смазке в книгах по «Триботехнике».

Смеем надеяться, что наш труд окажется полезным не только студентам, но и создателям прогрессивных механических систем.

ЧАСТЬ I. ПРИНЦИПЫ ТРИБОТЕХНОЛОГИИ

ГЛАВА 1. МЕХАНИКА ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

1.1. Трибологическая система (ТС). Входные величины, выходные величины, структура и состав ТС

1.1.1. Основные термины и определения

Трение (внешнее трение) возникает при относительном движении контактирующих, механически взаимодействующих тел, это результат различных видов сложного взаимодействия, при котором протекают разнообразные механические, физико-химические, электрические и др. процессы. Их соотношение может резко различаться в зависимости от характера нагружения, свойств материалов и сред. Основной характеристикой внешнего трения является *сила трения* – реакция, препятствующая взаимному перемещению.

Классификация видов трения осуществляется по следующим признакам:

- по наличию смазки – газовое, жидкостное, граничное, сухое, в вакууме;
- по кинематике движения – трение скольжения, качения, верчения;
- по динамическим условиям – трение покоя и трение движения;
- по характеристикам надежности – нормальные и критические (отказовые) процессы трения; и др.

Сухое трение – трение двух твердых тел при отсутствии на их поверхностях введенного смазочного материала любого вида. Возможно в вакууме, в обычных условиях – в тормозах, торсионах. При трении в вакууме поверхно-

стная пленка, разрушаемая в процессе трения, не успевает восстанавливаться и происходит взаимодействие между ювенильными поверхностями, что сопровождается схватыванием, а коэффициент трения значительно выше, чем при сухом трении на воздухе.

Ювенильная поверхность – свежееобразованная поверхность металла, свободная от окисных пленок и других загрязнений. Обладает повышенным энергетическим потенциалом, что обуславливает склонность к адгезионному взаимодействию (схватыванию) таких поверхностей при контактном взаимодействии.

Трение со смазкой – трение двух твердых тел при наличии на контактирующих поверхностях введенного смазочного материала любого вида. Различают граничное и жидкостное трение.

Граничное трение – вид трения двух твердых тел, при котором свойства жидкого смазочного материала отличаются от свойств жидкости в объеме. Работоспособность узлов трения определяется способностью граничных слоев разделять поверхности трения, предотвращая непосредственный металлический контакт, повышающий износ, приводящий к заеданию, схватыванию, задиру. При исчезновении граничных слоев граничное трение переходит в сухое.

Жидкостное трение – трение в условиях, когда создаваемый между взаимодействующими поверхностями слой жидкости или газа полностью разделяет их, исключая контактирование микронеровностей. Давление в слое возникает в результате относительного движения поверхностей (гидродинамическое и газодинамическое трение) либо под действием внешнего давления (газостатическое и гидростатическое трение). На толщину смазочного слоя влияют: вязкость жидкости, скорость относительного перемещения, величина нормальной силы, действующей на поверхность, геометрия контактирующих поверхностей.

Эластогидродинамическая смазка – вид трения двух твердых тел в условиях, когда толщина слоя смазочного материала определяется упругими свойствами материалов поверхностей трения и смазочного материала, а также реологическими свойствами последнего в зоне соприкосновения поверхностей. *Эластогидродинамическая теория трения* объединяет классическую теорию гидродинамики с учетом условий контакта, влияющих на свойства смазочной жидкости, и деформацию контактирующих деталей для определения распределения давления в зоне контакта, формы и толщины пленки смазки, ее несущей способности. Процесс трения характеризуется следующими переменными: эк-

вивалентным радиусом кривизны, эквивалентным модулем продольной упругости, характеристиками вязкости жидкости, нагрузкой на контакт, скоростью перемещения, толщиной слоя смазки [43, 44].

Трение скольжения – трение движения соприкасающихся тел, при котором их скорости в точках касания различны (вал – подшипник скольжения; гильза цилиндра – поршневое кольцо; суппорт станка – направляющая станины; колодочные тормоза).

Трение качения – трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел в точках их касания одинаковы по значению и по направлению (колесо при незаторможенном движении по рельсу; в идеальных условиях – шарики (ролики) подшипника качения).

Трение качения с проскальзыванием – трение движения, при котором происходит одновременное качение и скольжение соприкасающихся тел. Проскальзывание происходит, когда внешняя сдвигающая нагрузка превышает силу сцепления (зубчатые колеса; шарики (ролики) подшипника качения).

Основные численные характеристики трения:

– **сила трения** – реакция, возникающая в месте соприкосновения тел и препятствующая их относительному перемещению;

сила сухого трения скольжения:

- по закону Амонтона: $F_{\text{ск}} = f \cdot p$, где f – коэффициент трения скольжения, p – сила нормального давления;
- по двучленному закону трения Дерягина: $F_{\text{ск}} = f_t (p + p_0 A)$, где f_t – истинный коэффициент трения, p_0 – добавочное давление, вызванное силами молекулярного притяжения, A – общая площадь непосредственного контакта тел;

сила сухого трения качения

- по закону Кулона: $F_{\text{кач}} = f_{\text{тр.к}} \cdot p/R$, где $f_{\text{тр.к}}$ – коэффициент трения качения, R – радиус.
- **коэффициент трения** – отношение силы трения к реакции, направленной по нормали к поверхности касания, возникающей при приложении нагрузки.

Молекулярно-механическая теория трения (теория Крагельского) – трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением отдельных выступов поверхности (механическая составляющая), так и силами адгезии (молекулярная составляющая).

Виды **механического взаимодействия** (на примере единичной неровности): *а* – при упругом контакте, *б* – при пластическом контакте, *в* – микрорезание, *г* – адгезия, *д* – когезия (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Схема механического контакта отдельной микронеровности с контртелом

Закон положительного градиента сдвигового сопротивления – для реализации внешнего трения на поверхности должен существовать слой с пониженным сопротивлением сдвигу, где и должны локализоваться все процессы взаимодействия и разрушения. Иначе внешнее трение переходит во внутреннее, развиваются патологические процессы.

Структурно-энергетическая теория трения (теория Костецкого) – теория трения, основные концепции и принципы которой разработаны в работах Б.И. Костецкого и представителей его школы. Согласно структурно-энергетической теории, фундаментальная закономерность трения и износа проявляется благодаря физическому механизму структурно-энергетической приспособляемости материалов при механических и термомеханических процессах. Для всех материалов и рабочих сред существуют диапазоны нагрузок и скоростей перемещения, в которых показатели трения и износа устойчивы, на несколько порядков ниже, чем вне этих диапазонов. Границы диапазонов определяются критическими значениями энергии активирования и пассивации, соответствующими условиями образования защитных упорядоченных диссипативных структур, обладающих свойством минимального производства энтропии. Трибосистема рассматривается как открытая термодинамическая система, обменивающаяся энергией и веществом с окружающей средой, а термодинамические силы представляют собой градиенты, характеризующие удаленность трибосистемы от термодинамического равновесия.

Дислокационная теория трения – теория, основанная на представлении, что каждое кристаллическое тело характеризуется определенным типом *дислокаций* и их плотностью. Согласно теории, поверхности реальных тел представляют собой сложные системы блоков, фрагментов зерен и выходов отдельных групп дислокаций. Силы трения (нормальные и тангенциальные) вызывают их миграцию, резкое увеличение плотности дислокаций, возникновение призматических петель, пор, пустот. Увеличение концентрации дефектов становится

причиной повышенной диффузионной активности металла, которая в зависимости от условий протекания процесса приводит к различным картинам изнашивания (окислительное, фреттинг, схватывание и т. д.) [46].

Третье тело – совокупность межповерхностных связей, продуктов их разрушения и сильно деформированных поверхностных слоев контактирующих тел. Наличие «третьего тела» обеспечивает положительный градиент сдвигового сопротивления.

В связи с кинетикой процесса внешнего трения выделяют (рис. 1.2):

– **статический контакт** – сухое трение, возникающее при относительном покое тел; связи имеют деформационное происхождение, тепловые явления практически не проявляются, диффузия незначительна, химические явления слабо выражены. Контактующие поверхностные объемы находятся в условиях всестороннего неравномерного сжатия. Нижележащие слои сопротивляются деформации, силы трения параллельны плоскости разъема.

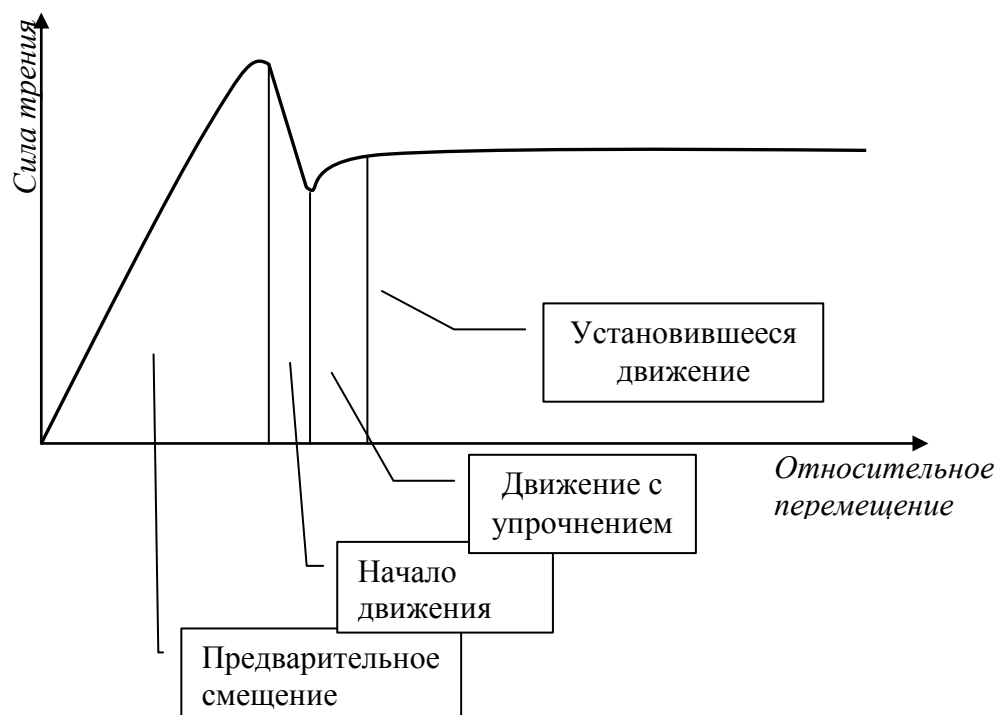


Рис. 1.2. Модель перехода от покоя к движению

– **предварительное смещение** – начало движения, сдвиг поверхностей, предшествующий переходу к скольжению. Наибольшее усилие предварительного смещения, при котором начинается скольжение, называется **предельным смещением**. Усилие, соответствующее предельному смещению – **сила трения покоя**.

– **установившееся движение** – главная роль принадлежит тангенциальному напряжению, деформации могут развиваться только в направлении дви-

жения. В результате происходит интенсивное направленное течение поверхностных объемов металла, образуются специфические текстуры, ориентированные в направлении движения.

Площадь контакта номинальная – для плоских контактов – площадь, по которой соприкасались бы тела при идеально гладкой поверхности; для тел с криволинейным очертанием – площадь, по которой соприкасались бы два идеально гладких тела под воздействием приложенной нагрузки, т. е. эта площадь возникает при деформациях, преимущественно упругих (рис. 1.3, $a \times b$).

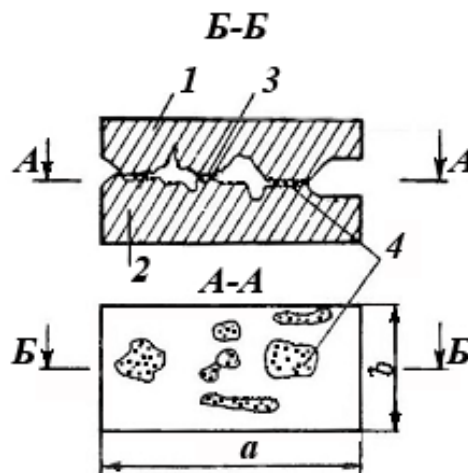


Рис. 1.3. Контактное сопряжение поверхностей:

- 1 – тело пары трения; 2 – контртело пары трения;
- 3 – шероховатость на пятнах контактирования;
- 4 – пятно контактирования пары трения

Площадь контакта контурная, пятно контакта – площадь, образованная деформацией локальных поверхностных объемов тел. Формирование обусловлено макропрофилем соприкасающихся поверхностей, механическими свойствами материалов и нагрузкой. Величины контурной площади контакта нормированы для тяжело нагруженных пар трения, например, зубчатых передач.

Площадь контакта фактическая – сумма дискретных площадок контакта двух шероховатых тел. Формирование под нагрузкой происходит в результате внедрения или смятия отдельных микронеровностей. На фактической площади контакта (ФПК) происходит превращение механической энергии в тепловую с последующей ее диссипацией. На величину ФПК влияют геометрические характеристики неровностей поверхностей, нагрузка, механические свойства материалов.

Согласно введенным площадям контакта различают соответственно **номинальное, контурное и фактическое давления**.

Несущая способность (конструкции, контакта, трибоповерхности) – характеристика, определяющая прочность, стойкость, сопротивляемость внешним нагрузкам. Например, под несущей способностью зубчатого колеса пони-

мают расчетную прочность зубьев на излом, на выкрашивание (контактная выносливость боковых поверхностей зубьев), на заедание, на износостойкость.

Трибоэлектричество – возникновение электрических зарядов, наблюдающееся при трении диэлектриков, полупроводников или проводников различного или одинакового состава, но различной плотности, при трении металлов о диэлектрики или жидкости о металлы. Элементы пары трения при этом получают равные заряды противоположного знака – положительный заряд у более плотного тела или у жидкости с большим значением коэффициента поверхностного натяжения.

Трибологическая система (ТС) – многокомпонентный объект, охватывающий целый класс физических систем, объединяющим признаком которых является наличие трения. ТС представляет собой сложную открытую термодинамическую систему, образуемую при взаимодействии трущихся тел с участием промежуточной среды и части окружающей среды – то есть представляет собой совокупность всех участвующих в процессах трения, изнашивания и теплообразования элементов с учетом их свойств и связей, а также параметров, воздействующих на эти элементы извне, характеристик трения, изнашивания и теплообразования [2].

Трение является причиной сложных деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, которые необратимо изменяют параметры ТС. Следовательно, при ее описании необходимо учитывать, что трибосистема обладают структурой и функцией динамической системы.

Наиболее значимый выходной параметр ТС – коэффициент трения, поскольку он является результатом целого комплекса физико-химических процессов и его нельзя отнести к какой-либо одной детали. Также нельзя отнести к одному элементу ТС характеристики износостойкости (скорость изнашивания, интенсивность изнашивания и др.), так как они зависят от свойств всех элементов ТС в целом.

Модель ТС может быть представлена в виде некоторой логико-математической структуры, состоящей из нескольких подсистем (см. рис. 1.4).

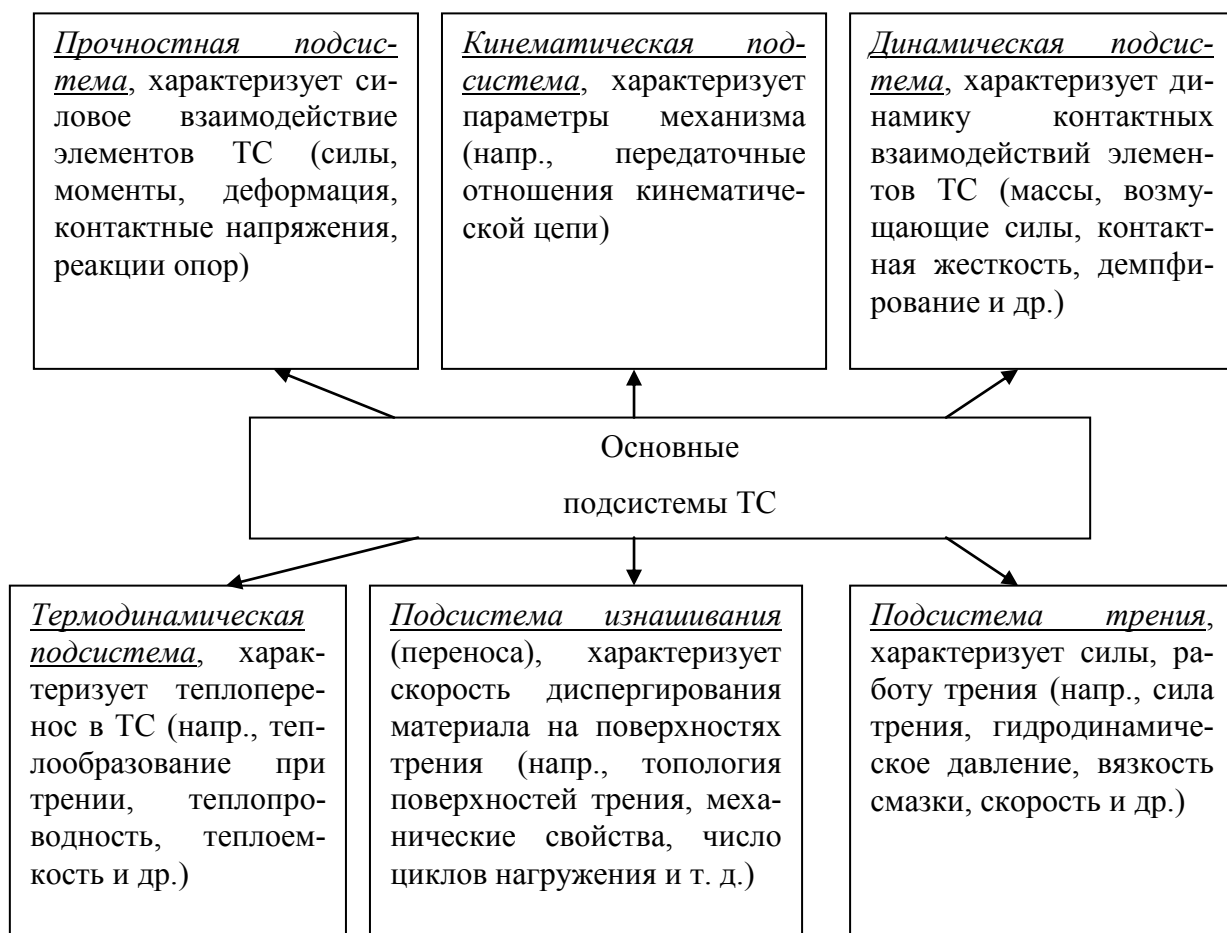


Рис. 1.4. Модель трибологической системы (ТС) и ее основные подсистемы

При изучении происходящих в ТС процессов выделяют несколько масштабных уровней: микроскопический (атомные и дислокационные размеры), мезоскопический (кооперативные дислокационные эффекты в объемах с размерами сечений $0,1 \dots 3,0$ мкм), структурный ($10^{-6} \dots 10^{-3}$ м) и макроуровень, где применимы методы теории упругости.

Результаты исследований свидетельствуют, что наиболее существенные изменения в состоянии материала, деформируемого трением, ведущие к разрушению, происходят на мезоскопическом уровне. К этому уровню относятся микронеровности поверхностей (высотные характеристики), флуктуации полей напряжений при встречах микронеровностей, фрагментированные микрообъемы материала и др.

Сам разрушающийся поверхностный слой материала толщиной $\sim 0,1 \dots 3,0$ мкм тоже, как правило, за исключением грубых форм износа, имеет мезоскопический масштаб. Такой масштабный предел в физике и металловедении связывают с предельно возможной длиной пробега дислокаций [2, 45].

«Энергоемкость» различных процессов поверхностного разрушения можно приблизительно оценить по удельной работе износа (см. табл. 1.1)¹.

Таблица 1.1. Классификация видов износа по параметру удельной работы износа $A_{из}$

Вид износа или повреждаемости	Удельная работа износа или повреждаемости, $A_{из}$, Дж/мм ³
Нормальный механохимический износ	100000...100000000
Механохимическая форма абразивного износа	100000...1000000
Фреттинг-процесс	10000...100000
Схватывание II рода	1000...10000
Схватывание I рода	100...1000
Механическая форма абразивной повреждаемости	10...100

1.1.2. Классификация видов изнашивания

Изнашивание – процесс постепенного изменения размеров детали (образца), происходящий при трении. Кроме изменения размеров происходит определенная трансформация структуры и свойств поверхностных слоев (см. рис. 1.5).

Изнашивание допустимое – вид разрушения поверхностей трения, главный признак которого – отсутствие любых видов разрушений основного материала, процессы локализованы в поверхностных слоях вторичных структур (механохимическое окислительное изнашивание, механохимическое изнашивание пленок неокислородного происхождения, механохимическая форма абразивного изнашивания).

Изнашивание критическое (недопустимое, патологическое) – возникает при нарушении нормальных условий внешнего трения (схватывание, заедание, механическая форма абразивного изнашивания, усталостные повреждения, фреттинг-процесс, смятие, эрозия, кавитация, коррозия).

Основные показатели, характеризующие нормальные и патологические процессы изнашивания, представлены в табл. 1.2.

¹ Стадниченко, В. Н. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В. Н. Стадниченко, О. Н. Трошин, Н. Г. Стадниченко, А. В. Приймак, И. И. Просяник // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2011. – № 1(27). – С. 51-61.

Таблица 1.2. Приблизительные характеристики нормального и патологического процессов трения

Характеристика	Нормальное трение	Патологические процессы
Коэффициент трения	0,005...0,15	0,3...40
Износ (мкм на 1000 м пути)	менее 0,01	100 и больше
Шероховатость, Ra	0,16 и ниже	80...20

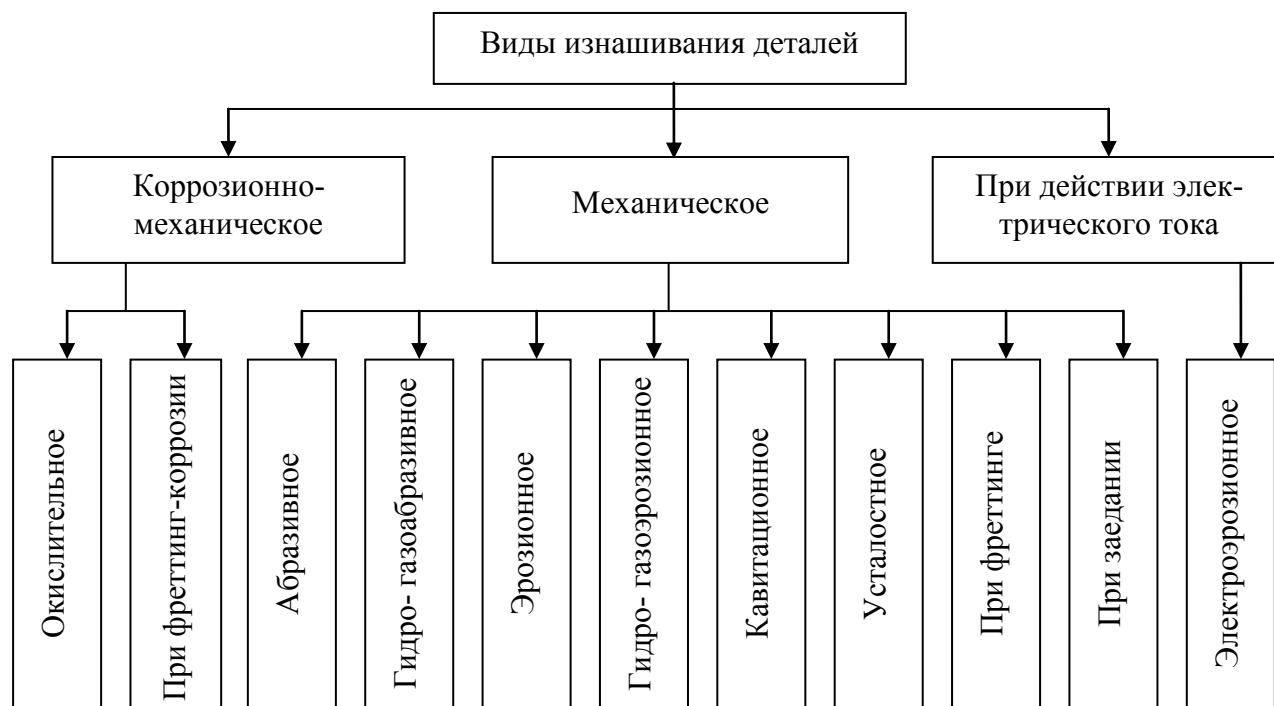


Рис. 1.5. Классификация видов изнашивания

Изнашивание коррозионно-механическое – наиболее распространенная форма изнашивания, постепенное разрушение поверхностей трения в результате химического и (или) электрохимического взаимодействия активизированных пластической деформацией поверхностных слоев материала с различными активными элементами жидкой или газовой среды – чаще всего кислородом (о к с л и т е л ь н о е и з н а ш и в а н и е), серой, фосфором, хлором, азотом, углеродом. Состоит в деформации, текстурировании поверхностных объемов металла, их дальнейшем взаимодействии с активными компонентами рабочей среды, образовании вторичных структур и их разрушении. Скорость образования вторичных структур равна или выше скорости из разрушения. Имеет несколько форм проявления в зависимости от условий трения. Возникает при трении скольжения и качения, при сухом трении и граничной смазке. Повышение износостойкости может быть достигнуто за счет изменения толщины и прочности вторичных структур. Применяются различные виды упрочнения,

металлизация, химико-термическая обработка и др. методы, введение специальных химически активных присадок.

Изнашивание абразивное – процесс разрушения поверхностей трения воздействием абразивных частиц, которые могут проникать извне (с воздухом, топливом, смазкой) или образовываться непосредственно в зоне трения (твердые структурные составляющие материалов трения, продукты износа). Существуют две формы абразивного изнашивания: *допустимая форма*, когда преобладает механохимическое разрушение и происходит пластическое деформирование поверхностных объемов, образование окисных пленок и их последующее разрушение; *патологическая форма*, с преобладанием механического разрушения: происходит внедрение абразивных частиц в поверхностные слои и разрушение основного металла без снятия или со снятием микростружки. Повышение износостойкости достигается исключением абразивных частиц из зоны трения (фильтры, защитные кожухи и т. п.) и повышением твердости трущихся поверхностей.

Схватывание I рода – вид критического изнашивания при сухом и граничном трении в условиях механических перегрузок контакта (при скольжении с малыми скоростями и высокими давлениями, значения которых превышают предел текучести материала). Проявляется в образовании локальных металлических связей, их деформации и разрушении с отделением частиц металла или их налипанием. Скорость образования металлических связей превышает скорости других процессов. Глубина разрушающегося слоя – до 0,5 мм, температура поверхности до 100 °С, шероховатость Ra 10...20 мкм; изменений химического и фазового состава поверхностей нет. Устранение возможно следующими способами: повышение твердости и снижение пластичности материала поверхностей трения (различными методами упрочнения) и физико-химическая защита контактирующих поверхностей. Встречается во фрикционных муфтах, направляющих скольжения, зубчатых передачах, винтовых парах, цапфах тихоходных тяжелонагруженных валов, люковых закрытиях, аппаратах и др.

Схватывание II рода – процесс недопустимой повреждаемости при трении скольжения с большими скоростями и значительными удельными давлениями, что обуславливает интенсивный рост температур (так называемые термические перегрузки контакта). Состоит в возникновении местных металлических связей, их деформации и разрушении (образование трещин, намазывание, перенос металла и отделение частиц с поверхностей трения). Металл разупрочняется вплоть до оплавления, в результате образуются структуры рекри-

сталлизации, отпуска, закалки и вторичной закалки. Глубина разрушающегося слоя – до 0,10 мм, температура поверхностных слоев до 1500 °С, шероховатость поверхности $Ra = 2,5 \dots 5$ мкм. Характерно для быстроходных зубчатых передач, шеек коленвалов, пар «втулка – поршневое кольцо ДВС» и т. п.

Заедание – вид критического изнашивания, крайняя форма проявления схватывания II рода, проявляющаяся в образовании металлических связей, их деформации и разрушении. Скорость образования металлических связей превышает скорость других процессов. Происходит при трении с большими скоростями перемещения и значительными удельными давлениями, что при определенных условиях приводит к росту температуры и интенсивному окислению. Вместе с ростом толщины окисной пленки падает ее прочность. Теплопроводность образующихся окислов почти на порядок ниже теплопроводности основного материала; различны также коэффициенты линейного расширения. При достижении пленкой определенной толщины максимальные касательные напряжения попадают в переходную зону между окислом и основным материалом, уже ослабленную различием коэффициентов линейного расширения и экранирующим действием окисной пленки для теплового потока, направляющегося к поверхности из зоны микропластических деформаций слоев основного материала, которые значительно пластичнее окислов. Весь этот комплекс упругих, пластических и тепловых деформаций в переходной зоне приводит к отделению окислов с поверхности, мгновенному образованию ювенильных поверхностей, мгновенному мощному тепловому удару, под воздействием которого сгорает смазка, часть окислов восстанавливается до металла, поверхности привариваются, разрушаются в лавинообразном процессе заедания. Устранение заедания достигается увеличением теплостойкости деталей и улучшением отвода тепла. Применяется обработка поверхностей для создания неметаллических пленок (сульфидных, фосфидных, оксидных и т.д.), наплавка специальных теплостойких твердых сплавов, введение противозадирных присадок в смазочный материал, увеличение маслостойкости поверхности. Характерно для работы быстроходных тяжело нагруженных зубчатых передач, цилиндров, поршней, поршневых колец двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, подшипников качения, кулачковых механизмов и др.

Контактная усталость – разрушение поверхностей трения, работающих при пульсирующем или знакопеременном контактном нагружении. При этом основные признаки и свойства усталости (образование и постепенное развитие усталостных трещин, влияние концентрации напряжений, полулогарифмическая зависимость ресурса от напряжения и др.) сохраняются.

рифмическая зависимость между нагрузкой и долговечностью и др.), наряду с этим присутствуют специфические процессы – окисление при трении, пластические течения поверхностных слоев, тепловые процессы. Проявляется в виде начального и прогрессивного выкрашивания (питтинга). Начальное выкрашивание возникает в период приработки. Если контактные напряжения снижаются слишком медленно или когда начальное выкрашивание развилось на твердых (цианированных, азотированных) поверхностях, оно переходит в прогрессивное выкрашивание. При больших приведенных радиусах кривизны контактирующих тел трещина может образоваться под поверхностью. Контактная усталость зависит от физико-механических свойств материалов, скоростей качения и скольжения, режимов нагружения, вязкости масла, способа его подачи, шероховатости и др. На упрочненных азотированием, цементированием и т. п. поверхностях иногда наблюдаются повреждения в виде отслаивания упрочненного слоя в результате некачественной переходной зоны между слоем и сердцевиной или низкой твердостью сердцевины. Глубина поврежденного слоя может достигать 5 мм; температура поверхности – до 100 °С. Характерна для подшипников качения, зубчатых передач и т. д. При определенной доле проскальзывания в паре трения качения контактная усталость не проявляется.

Смятие – один из видов критического изнашивания схватыванием I рода, проявляющийся в виде макроскопических объемных пластических деформаций материала. Деформации могут распространяться на весь объем материала или на какую-либо часть; масса деталей при этом не меняется. Типично для цветных металлов и сплавов (алюминия, свинца, баббитов); для стальных деталей обычно связано с превышением допустимых нагрузок. Характерно для винтовых пар, зубчатых передач и др., часто встречается в парах, работающих с ударным нагружением.

Фреттинг-процесс – разрушение поверхностей трения, проявляющееся в резко интенсифицированном окислении или схватывании. Процесс нестационарен, возможен при сухом и граничном трении. Модель фреттинга включает следующие фазы: динамическое нагружение при малых перемещениях (на порядок выше межатомных); резкое увеличение активности поверхностных слоев металла; динамическое окисление, динамическое схватывание; интенсивное разрушение. Может проявляться в любой ситуации, где поверхности находятся в контакте и подвергаются случайным вибрациям или переменным нагрузкам: горячие и пресовые посадки, шпонки и шпоночные канавки, муфты, проволоочные канаты и др. Методы борьбы: совершенствование конструкций (места

концентрации напряжений не должны совпадать с местами возможного возникновения фреттинг-процесса), повышение усталостной прочности, создание на поверхности сжимающих напряжений, введение консистентных смазочных материалов, применение защитных покрытий и др. [49].

Изнашивание водородное – разрушение металлического элемента пары трения вследствие поглощения водорода. Водород может образовываться при некоторых технологических процессах либо выделяться вследствие трибодеструкции материалов пары трения или элементов окружающей среды (смазочный материал, топливо, вода и др.). Процесс изнашивания состоит из следующих этапов: адсорбция водорода на поверхности трения; диффузия его в деформируемый слой стали; развитие зародышей трещин; диспергирование материала.

Методы борьбы: правильный выбор материалов пар трения (холоднодеформированная сталь может поглотить в 1000 раз больше водорода, чем отожженная); при возможности исключать из узлов трения полимеры или же применять электроотрицательные полимеры типа ПТФЭ; применять смазочные материалы, мало подверженные гидрогенизации; применять ингибиторы проникновения водорода; удалять технологический водород, например, полированием наводороженного слоя.

Изнашивание кавитационное – процесс разрушения поверхностей деталей потоком жидкости, движущейся с переменной скоростью. Кавитационные разрушения локальны и имеют вид каверн (углублений). Подвержены лопасти турбин, насосов, гребные винты, подводные крылья судов, наружные поверхности втулок цилиндров ДВС с водяным охлаждением и др.

Изнашивание эрозионное – изнашивание в результате многократно повторяющихся ударов по поверхности изнашиваемого тела потоков жидкости или газа. Среда оказывает сильное влияние на износостойкость. Возможна значительная пластическая деформация поверхностного слоя, образование вторичных структур. Изнашивание газо- и гидроабразивное – подкласс эрозионного изнашивания, разрушение поверхности тела под действием абразивных частиц (инородных тел или фрагментов разрушения), увлекаемых потоком жидкости или газа. При гидроабразивном износе разрушение ускоряется как за счет вымывания продуктов разрушения жидкостью, так и за счет добавления факторов кавитации и коррозии. Скорость изнашивания велика, определяется кинетической энергией частиц, углом соударения (так называемый «угол атаки абразивных частиц»), концентрацией их в потоке. Вторичные структуры, как правило, не образуются. Характерно для запорной и регули-

рующей аппаратуры трубопроводов, деталей гидротурбин, систем водяного охлаждения, в автомобиле – на рабочих поверхностях тарелок выпускных клапанов двигателя и жиклерах карбюратора.

1.1.3. Износ. Методы измерения износа

Износ – результат изнашивания, проявляющийся в виде отделения или остаточной деформации материала. Оценивается непосредственно по изменению размеров, массы или по косвенным признакам (например, содержание продуктов износа в смазочном материале). Износ, выраженный в единицах длины, объема, веса называют **абсолютным**. *Линейный* износ определяют по изменению размера по нормали к поверхности трения, *объемный* – по изменению объема, *весовой* – по изменению веса (массы). Отношение абсолютного износа к пройденному пути трения называют **интенсивностью изнашивания** $j = du / dL_u$, а ко времени испытания – **скоростью изнашивания** $v_u = du / dt$. **Предельным** называют износ, при котором машина (деталь, поверхность) выходит из строя по параметрическим или функциональным отказам.

Коэффициент износа – безразмерная характеристика процесса изнашивания, определяемая $K_u = V \cdot p / L_u \cdot P$, где V – объем продуктов износа, p – давление для более мягкого материала, L_u – путь трения, P – нагрузка.

Метод измерения износа по изменению технических параметров машин – интегральный метод оценки износа механизма по изменению параметров его работы (выхлоп, расход масла, топлива, падение мощности, изменение температуры, утечки рабочих сред, потеря точности и пр.). Метод связан с длительной эксплуатацией машин и механизмов. Близкая разновидность – вибро-акустические методы, основанные на анализе общего уровня шума или вибраций, частотном и амплитудном анализе спектра шумов, отдельных гармоник, анализ их изменений во времени.

Микрометрирование – метод оценки износа по изменению линейных размеров детали после испытаний на износ (эксплуатации). Измерение производится при помощи микрометра (или подобного прибора). Сопряжен со значительными погрешностями: изменение размера детали может быть следствием не только износа, но и деформации; неизбежны погрешности, зависящие от фактически непостоянного контакта измерительного наконечника прибора с поверхностью детали, вследствие непостоянства температуры и т. п. Поэтому даже при использовании измерительных приборов высокого класса точности результирующая погрешность при определении износа составляет величину

порядка ± 5 мкм. Метод требует полной или частичной разборки сопряжения. В результате микрометрирования устанавливается лишь конечная величина износа за определенный период работы механизма.

Весовой метод – определение износа по потере массы детали после испытаний на износ (эксплуатации). Метод является интегральным, потому что фактически определяется суммарная потеря массы по всей поверхности трения. Применяют для исследования небольших деталей (с ростом массы падает точность измерений). Требуется разборка сопряжения и тщательная очистка детали. Метод неприменим, когда износ проявляется в основном в пластическом деформировании (изменение размеров почти не проявляется в изменении массы). Ограниченно используется в случае исследования износа деталей из пористых материалов (металлокерамические, бронзографитовые, железографитовые материалы), поскольку они способны удерживать различные объемы масла при нагреве и охлаждении, а, следовательно, изменять в зависимости от этого характеристику по массе деталей.

Химический анализ – способ оценки интегральной величины износа по обогащению смазочного масла продуктами изнашивания. Содержание металла в пробе оценивается при помощи химического анализа или полярографическим методом. Основным показателем изнашивания служит скорость изменения концентрации металла в масле. Этим методом измеряется именно скорость, с которой происходит изнашивание, а не сам износ, не его абсолютная величина, поэтому он в основном применяется при сравнительной оценке влияния на изнашивание деталей таких факторов, как сорт масла, температура охлаждения жидкости и т. д.

Спектральный анализ – способ оценки интегральной величины износа по обогащению смазочного масла продуктами изнашивания. Содержание примесей определяется методами спектрального анализа. Чувствительность спектрографического метода определения содержания металлических примесей в масле достигает величины 10^{-6} г, а для некоторых элементов 10^{-8} г на 1 г масла. Такая чувствительность позволяет, например, определить, через несколько часов работы двигателя содержание в масле легирующих элементов материала коленчатого вала, цилиндровых втулок, вкладышей, поршневых колец.

Метод профилографирования – определение величины износа сравнением профилограмм, снятых до и после испытаний. Профилографы-профилометры позволяют определить износ с точностью до ± 1 мкм. Метод

целесообразно применять для деталей, имеющих неравномерный износ по поверхности. Особенности процедуры профилографирования ограничивают номенклатуру исследуемых деталей, метод используют обычно для определения износа относительно небольших деталей, имеющих достаточно чистую и простую поверхность. Требуется разборка приработанного сопряжения.

Метод искусственных баз – определение линейного износа по изменению размеров суживающегося углубления заранее известного профиля, выполненного на исследуемой поверхности. Положение дна углубления при износе поверхности остается неизменным, поэтому оно служит искусственной базой, от которой ведется измерение расстояния до поверхности. Зная заранее соотношение длины и глубины отпечатка, и наблюдая за изменением его, можно определить величину линейного износа (рис. 1.6). Углубление может быть получено в результате вдавливания наконечника в виде пирамиды или конуса, высверливанием конического углубления, вырезанием, вращающимся резцом остроугольной лунки, выпиливанием или шлифованием диском. Размер диагонали лунки выбирается в зависимости от материала, назначения детали и предполагаемой величины износа (обычно не более 1 мм).

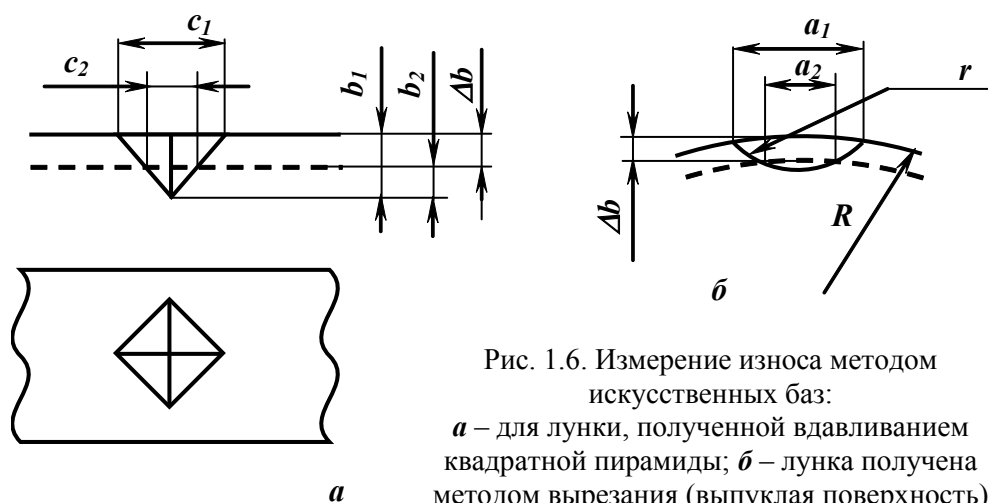


Рис. 1.6. Измерение износа методом искусственных баз:
а – для лунки, полученной вдавливанием квадратной пирамиды; **б** – лунка получена методом вырезания (выпуклая поверхность)

Радиометрические методы – способ оценки интегральной величины износа по обогащению смазочного масла продуктами изнашивания. Радиоактивные частицы изнашивания, попавшие в смазку, регистрируют с помощью специальной аппаратуры, а затем определяют весовой или линейный износ материала. Способы включения радиоактивных атомов в металл изучаемой детали: введение радиоактивного изотопа элемента, входящего в состав сплава; радиоактивный изотоп вводится как искусственная примесь к сплаву; специаль-

ные вставки из сплава, содержащего радиоактивный изотоп. Метод высокочувствительный, возможно непрерывное наблюдение за изменением интенсивности излучения продуктов износа и непрерывная запись хода изнашивания, не требует разборки машин. Требуется сложная подготовка исследуемых деталей, специальная аппаратура для измерения интенсивности излучения, создание особых условий и применение необходимых мер предосторожности для охраны здоровья персонала.

1.2. Основные закономерности и методы исследования процесса изнашивания

К основным факторам, определяющим интенсивность изнашивания, относятся:

- материалы пары трения;
- род трения (скольжения, качения, качения с проскальзыванием);
- вид трения (сухое, граничное, жидкостное);
- величина нагрузки;
- характер нагрузки (постоянная, неустановившаяся, знакопеременная);
- скорость перемещения трущихся поверхностей;
- температурные условия
- среда (воздух, инертный газ, вакуум, абразив, морская вода и т.п.);
- вид контакта пар трения (точка, линия, плоскость, цилиндр, сфера);
- характер движения (равномерное, непрерывное и т.д.);
- вид движения (вращательное, поступательное, возвратно-поступательное).

Влияние нагрузки, температуры и скорости трения на коэффициент трения, скорость изнашивания и износостойкость поверхностей

Нагружение – основной параметр, определяющий интенсивность изнашивания. При абразивном изнашивании зависимость между давлением, величиной пути трения и величиной износа прямопропорциональная, при адгезионном – нелинейная пропорциональная. Динамическая нагрузка приводит к повышению термических напряжений и проявлению других эффектов импульсной нагрузки. При циклической нагрузке возрастает роль усталостных процессов.

Скорость в зоне трения – влияние связано с видом изнашивания. Увеличение скорости скольжения сначала приводит к резкому уменьшению износа, которое объясняется ростом окислительных пленок и высоким градиентом механических свойств. Увеличение скорости при сухом трении и абразивном изнашивании вызовет лавинные процессы резания, царапание и возможное заедание. При высоких скоростях движения смазочного материала или СОЖ абразивному изнашиванию может сопутствовать эрозионное, значительно интенсифицирующее процесс разрушения.

В практически встречающемся диапазоне скоростей трения в зоне трения протекают три основных процесса: схватывание I рода, схватывание II рода и окисление (рис. 1.7) [12].

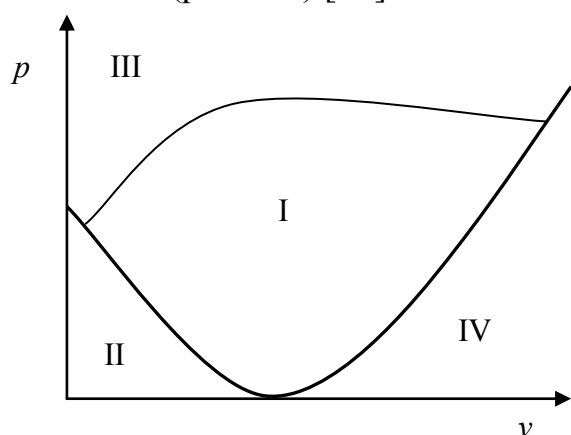


Рис. 1.7. Схема расположения областей нормального и патологических процессов износа:

I – область нормального износа; II – переходная зона; III – интенсивная механическая повреждаемость (схватывание I рода); IV – схватывание II рода (p – давление, v – скорость трения)

Температура – решающую роль играет контактная температура. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры фактически такое же, как и от скорости скольжения. При небольших скоростях скольжения температура существенно не повышается за счет интенсивного отвода из зоны трения материалами контактирующих деталей и средой. В зоне нормального трения почти вся работа трения переходит в теплоту, износ минимальный. С дальнейшим ростом температур износ будет возрастать, если же имеет место избыточный нагрев, может возникнуть размягчение деформированных объемов материала и их пластическая деформация. Износ при этом резко увеличивается и становится катастрофическим.

Критические параметры (и з н а ш и в а н и я) – комбинации параметров внешних воздействий, соответствующих смене определяющих процессов изнашивания. Наиболее распространенной является комбинация: нагрузка, скорость, температура (критерий $p v \theta$). Монотонное увеличение какого-либо параметра при прочих постоянных условиях позволяет выделить критические точки, характеризующие смену квазистационарного разрушения. Так, монотонное

увеличение нагрузки позволяет выделить две критические точки (усталостное подповерхностное разрушение и адгезионное изнашивание); монотонному увеличению поверхностной температуры соответствуют несколько критических точек (температура десорбции граничных слоев смазочного материала, температура химической модификации, температура фазовых переходов, критические точки образования «белых слоев» и некоторых видов вторичных структур и др.).

Типичные кривые износа для различных видов изнашивания

Классическая кривая имеет три участка, соответствующая трем стадиям изнашивания: приработка, нормальное изнашивание, катастрофическое изнашивание (см. рис. 1.8).

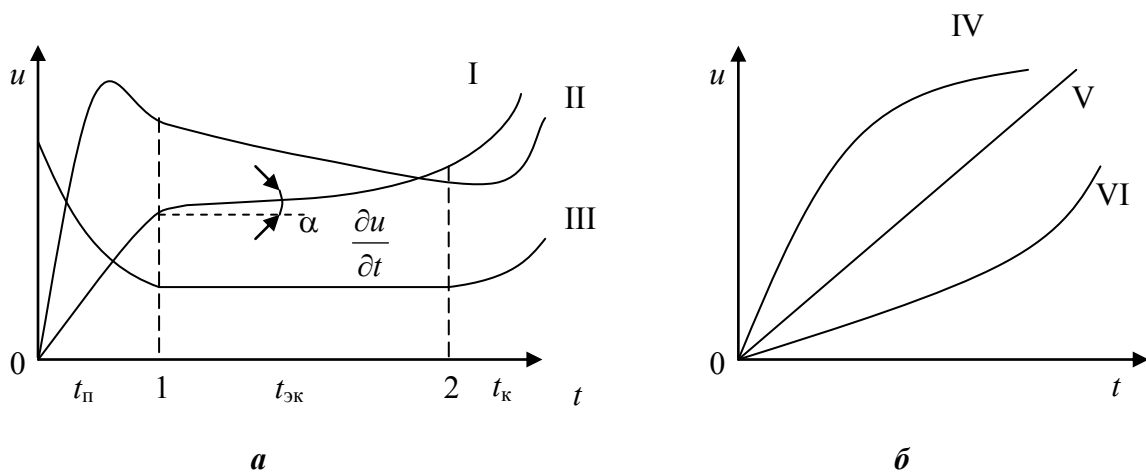


Рис. 1.8. Зависимость износа u от времени t работы сопряжения:

I, IV, V, VI – кривые изнашивания; II – кривая изменения температуры поверхностей трения; III – скорости изнашивания; $t_п$ – время приработки; $t_эк$ – время эксплуатации при нормальном изнашивании; $t_к$ – стадия катастрофического изнашивания

Приработка ($t_п$) – начальная стадия работы пары трения, нестационарный режим изнашивания с убывающей скоростью или отрицательным ускорением изнашивания

$$V_{ин} = \frac{du_{п}}{dt_{ин}} = \frac{d^2 \Delta u_{п}}{dt^2_{п}} < 0,$$

где $V_{ин}$ – скорость изнашивания взаимодействующих элементов, отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник, $\Delta u_{п}$ – конечное приращение величины износа, $t_п$ – время.

Время эксплуатации при нормальном изнашивании $t_{\text{ЭК}}$ – стационарный период работы трибосопряжения, во время которого скорость изнашивания постоянна.

$$V_{\text{изЭК}} = \frac{du_{\text{ЭК}}}{dt_{\text{изЭК}}} = \frac{d^2 \Delta u_{\text{ЭК}}}{dt_{\text{ЭК}}^2} = 0.$$

В этот период нагрузочные параметры трибосопряжения поддерживаются в рабочем режиме. Рациональная конструкция и оптимальная эксплуатация технического устройства характеризуется продолжительным периодом установившегося износа.

Катастрофическое изнашивание – заключительный период жизненного цикла трибосопряжения, характеризующийся нарастанием скорости изнашивания

$$V_{\text{изЭК}} = \frac{du_{\text{ЭК}}}{dt_{\text{изЭК}}} = \frac{d^2 \Delta u_{\text{ЭК}}}{dt_{\text{ЭК}}^2} > 0.$$

На рис. 1.8 представлена классическая кривая изнашивания трибосопряжения (рис. 1.8, **а**, кривая I). В частных случаях кривые износа имеют разновидности, характерные для отдельных классов трибосопряжений и видов изнашивания.

Для сопряжений, работающих в тяжелых условиях абразивного изнашивания, отсутствует период приработки и катастрофического износа, весь период эксплуатации трибосопряжения работает при $u = \text{const}$ (рис. 1.8, **б**, кривая V).

При неправильно организованной приработке, погрешностях конструкции трибосопряжения на кривой отсутствует участок установившегося износа, и приработка переходит в катастрофический износ (рис. 1.8, **б**, кривые IV, VI).

Методы исследования износостойкости

Оценка сопротивления изнашиванию различных материалов выполняется одним из методов:

- лабораторные испытания;
- экспериментально-расчетный метод по критериальным зависимостям.

Испытания материалов – определение технологических и эксплуатационных свойств материалов с помощью специальных машин, приборов и приспособлений при различных температурах. Различают испытания материалов: механические (на растяжение, изгиб, кручение, срез, усталость, ползучесть, длительную прочность, удар); физические (определение электрической прово-

димости, теплопроводности, морозостойкости, магнитных и др. свойств); химические (определение химического состава, способности противостоять хим. воздействию (в частности, окислению) и др.); структурные (определение макро- и микроструктуры, кристаллической структуры и т.д.); технологические (деформационная способность, предельная пластичность, обрабатываемость резанием, свариваемость, жаростойкость и жаропрочность и т. д.).

Экспериментально-расчетные методы оценки износостойкости предполагают получение статистических моделей износостойкости, по которым расчетным путем, опираясь на свойства материала элементов трибосопряжения (критерии износостойкости), можно получить данные по износостойкости материала. В качестве критериев для оценки износостойкости материалов принято использовать отдельные механические свойства (твердость, предел прочности, сопротивление срезу и т.д.) или их комплексы. Наиболее перспективными являются критерии износостойкости, объединяющие прочностные и пластические свойства материалов.

Экспресс-методы определения износостойкости материалов – функция интенсивности изнашивания представляется в виде некоторой функции контактного давления, зависящей от нескольких параметров. Эпюры контактного давления определяются из решения соответствующей задачи контактного взаимодействия. Параметры изнашивания определяются в соответствии с результатами непрерывного измерения величины линейного износа, с учетом среднеквадратичного отклонения функции интенсивности изнашивания от степенной функции эпюры контактного давления.

Стендовые испытания проводятся в условиях, обычно соответствующих типовому эксплуатационному режиму. Их задача – анализ эффективности тех или иных конструкционных и технологических мероприятий, направленных на улучшение триботехнических свойств, установление ориентировочных сроков службы деталей и предельно допустимого износа, контроль качества изготовления изделий и др.

Ресурсные испытания – воспроизведение в лаборатории внешних воздействий, соответствующих условиям типовой эксплуатации узла. Определяют наработку до достижения конструкцией предельного состояния, при котором ее дальнейшая эксплуатация небезопасна или нецелесообразна из-за снижения эффективности. В процессе испытания выявляют критические элементы конструкции, отрабатывают методы технического обслуживания.

Эксплуатационные испытания – испытания машин в условиях эксплуатации. Производятся в соответствии с государственными стандартами, а при их отсутствии — в соответствии с программами и методиками. Программа испытаний определяет их вид и цель, содержание испытаний и их последовательность, состав и обязанности участников испытаний. Полный объем эксплуатационных испытаний машины заключается в технической экспертизе, лабораторных, полевых и эксплуатационно-рабочих испытаниях. В процессе этих испытаний определяют показатели эффективности работы и надежность машины при различных условиях эксплуатации, для которых она предназначена.

Ускоренные испытания – испытания изделия, позволяющие получить данные о характеристиках изделия и показателях качества в более короткие сроки, чем в условиях эксплуатации. Сокращение сроков испытаний достигается путем изменения одного или нескольких параметров. Частный случай – **форсированные** испытания, проводимые при повышенных значениях нагрузок, температур, скоростей и др. факторов. В трибологии применение ускоренных испытаний следует проводить с осторожностью, так как при форсировании могут существенно исказиться ведущие механизмы трения и изнашивания.

В табл. 1.3. представлены виды испытаний, их основные характеристики и области применений.

Таблица 1.3. Виды (этапы) испытаний на износостойкость и их характеристика (ГОСТ 30480-97)

Виды (этапы) испытания	Объекты испытаний	Условия испытаний	Характеристика получаемых данных	Область применения
1. Лабораторные испытания образцов материала	Образцы материала	Вариация нагрузкой и (или) температурой при различных условиях и видах воздействий окружающей среды	Оценка совместимости пар трения; определение предельных силовых и тепловых нагрузок и установление критических точек, после которых наблюдается заметное изменение силы трения или уменьшение износостойкости	Исследование новых материалов, приближенная оценка области их рационального применения, анализ механических и физико-механических процессов в поверхностных слоях. Контроль стабильности свойств материалов при их производстве

Виды (этапы) испытания	Объекты испытаний	Условия испытаний	Характеристика получаемых данных	Область применения
2. Лабораторные испытания малогабаритных образцов	Малогабаритные образцы трибосопряжения	Моделированные условия внешнего воздействия, обеспечивающие воспроизведение заданного процесса изнашивания, температурно-силовых полей такой же интенсивности, как в натуральных трибосопряжениях	Фрикционно-износные характеристики пары трения при заданных условиях	Испытаниям должно предшествовать определение масштабных коэффициентов перехода. Анализ износостойкости материала, исследование процесса изнашивания. Получение исходных данных для натуральных испытаний
3. Стендовые испытания	Натурные образцы трибосопряжений, сборочные единицы	Воспроизведение на стенде реальных условий эксплуатации	Показатели износостойкости при моделированных условиях эксплуатации	Оценка влияния на фрикционно-износные характеристики пары трения конструкции трибосопряжения. Установление ресурса изнашивания элементов и норм допустимого износа. Контроль качества при производстве
4. Полигонные испытания	Готовые изделия, комплексы	Моделированные на полигоне условия, соответствующие одному или нескольким внешним воздействию факторам	Показатели и значение износа при моделировании одного или нескольких воздействующих факторов на полигоне	Оценка влияния конструкции и одного или нескольких внешних воздействующих факторов на износостойкость трибосопряжений
5. Эксплуатационные испытания	Готовые изделия и комплексы	Реальное разнообразие условий изнашивания или типовые условия эксплуатации	Ресурс изделий по параметрам износостойкости	Оценка влияния конструкции изделия и реальных условий эксплуатации на износостойкость

1.3. Эффект избирательного переноса при трении

Избирательный перенос или «эффект безызносности» – сложная совокупность механических, физических и физико-химических процессов, протекающих в смазочной среде и на трущихся поверхностях (открытие № 41 от 12.11.56 г.). Состоит в образовании защитной пленки при трении в условиях граничной смазки. Сопровождается снижением коэффициента трения до значений, характерных для жидкостного трения, заметным снижением износа, рис. 1.9.

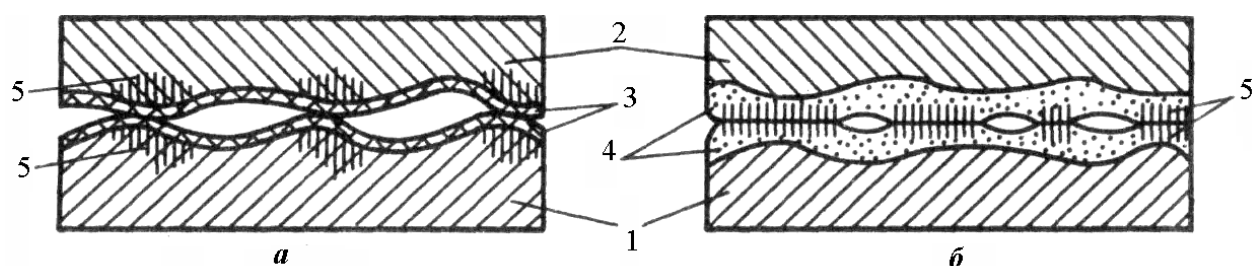


Рис. 1.9. Схема контакта деталей: распространение деформаций при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б):

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – серовитные пленки; 5 – места деформации

Серовитная пленка (лат. *servo vitte* – спасти жизнь) – особая структура на поверхностях трения, характерная для «эффекта безызносности», в которой реализуется особый механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, свойственных усталостным процессам. (Термин введен Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским).

Основные представления о характере избирательного переноса (ИП). Для возникновения ИП необходимо, чтобы на поверхностях трения происходили окислительно-восстановительные реакции. При трении эти реакции активируются, в результате происходит взаимодействие легирующих элементов медного сплава со смазочной средой (глицерином). Глицерин действует как слабая кислота, и из медного сплава уходят такие легирующие элементы как цинк, олово, свинец, алюминий, железо др. При этом поверхность трения детали из медного сплава обогащается медью.

Установлено, что под поверхностью трения медного сплава или меди в глицерине существует слой с минимальной плотностью дислокаций. Это падение плотности дислокаций объясняется действием эффекта Ребиндера, при котором продукты деструкции глицерина, действуя как поверхностно-активные вещества (ПАВ), адсорбируются на поверхности и понижают свободную поверхностную энергию, способствуя выходу дислокаций на поверхность.

Механизм образования сервовитной пленки и ее структура. В первый момент работы пары под действием приложенной нагрузки в зонах фактического касания появляются пластические деформации. Относительное скольжение сопровождается интенсивным повторяющимся деформированием поверхностного слоя, что приводит к накоплению усталостных эффектов и разрушению слоя. В результате трибохимических процессов появляются ПАВ. Одновременно происходит избирательное растворение легирующих элементов медного сплава вследствие разности их электродных потенциалов. Процесс наиболее интенсивно протекает на тех участках поверхности, которые подвергаются деформациям. В результате частицы разрушающегося слоя уходят в смазку – таким образом, в смазочной системе образуется дисперсионная система частиц. В силу диффузии и переноса дисперсные частицы в смазке движутся к поверхности стального образца и осаждаются на его поверхности. Так формируется сервовитная защитная пленка. Процесс продолжается до тех пор, пока на обеих поверхностях не образуется слой толщиной 1...2 мкм.

После того как медная пленка покрывает поверхности трения, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой и «вытягивать» атомы легирующих элементов, процесс растворения прекращается, и наступает **установившийся режим ИП.**

Свойства сервовитной пленки:

- 1) образуется только в зоне трения при наличии смазочного материала, ПАВ и при невысокой температуре;
- 2) образуется в результате распада медного сплава (твердого раствора);
- 3) пленка не способна к наклепу, имеет малые усилия сдвига, пориста, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности на другую, т. е. схватывается без образования повреждений и увеличения сил трения.

Условия, определяющие возникновение ИП в узлах трения. Осуществление режима ИП в трущихся сопряжениях зависит от комплекса факторов, которые можно отнести к технологическим, конструктивным и определяемым режимами работы различных узлов. К технологическим факторам относятся шероховатость контактирующих поверхностей и способ модификации поверхностей. В конструктивные факторы входят геометрия трущегося сопряжения (контакт по линии, в точке, плоскость по плоскости), коэффициент взаимного перекрытия, расположение материалов по твердости в парах трения, кинематика движения (вращательное, возвратно-вращательное, возвратно-

поступательное), способ подачи смазочной среды (проточная, окунанием, капельная), материалы пары трения, смазочная среда и т. п.

Для реализации избирательного переноса в подвижных сопряжениях необходимо выполнение следующих требований [13]:

- смазочные материалы должны содержать определенные поверхностно- и коррозионно-активные вещества, в том числе исключаящие возникновение пленок окислов на поверхности трущихся металлов, в этом случае свободная металлическая поверхность вступает в электрохимическое взаимодействие со смазкой и образует сервовитную пленку;

- шероховатость поверхности более твердой детали пары должна лежать в пределах $0,16 < Ra < 0,32$ мкм;

- контурные давления должны обеспечивать пластические деформации в зонах фактического касания;

- скорость скольжения $v_{\max} \gg v \gg 10^{-2}$ м/с, где $v_{\max}$ ограничена температурными свойствами смазочной среды;

- узел должен быть герметичным;

- система смазки должна обеспечивать непроточное смазывание.

В случае трения деталей из не содержащих медь металлов необходимо введение в смазочные материалы веществ (соли меди, ее частицы, сплавы на медной основе), которые служили бы исходным материалом для образования сервовитной пленки. То есть организация эффекта ИП идет по двум направлениям:

- применение металлоплакирующих смазок с поверхностно-активными компонентами;

- создание конструкционных материалов (в том числе металлополимерных), обеспечивающих режим ИП при трении, для узлов с эффектом самосмазывания и самовосстановления.

Эффект избирательного переноса используют в следующих узлах:

- подшипники качения (шарики и поверхности дорожек качения покрывают сервовитной пленкой, что увеличивает их контактную поверхность и несущую способность);

- металлообработка (для повышения стойкости режущего инструмента);

- нефтебуровое оборудование;

- шарнирные соединения самолетов;

- узлы трения автомобилей;

- текстильные машины;

- в машинах литейного производства;
- в бытовой технике.

Например, Николаевский опытный завод смазочных систем изготавливал централизованные системы смазки, позволяющие не только механизировать процесс ухода за технологическим оборудованием, но и применять в качестве смазочного материала металлоплакирующие смазки и создавать в трущихся парах возможность обеспечения эффекта безызносности. При этом, как показывал опыт эксплуатации оборудования, расход смазок сокращался на 25...30 % по сравнению с обычными смазками, а также уменьшались потери на трение [20].

ГЛАВА 2. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Понятие надежности трибологической системы.

Применяемые показатели работоспособности и трибологической надежности

Каждая машина создается с определенной целью и характеризуется выходными параметрами. Это могут быть показатели производительности, мощности, экономичности, прочности, точности и т. д. Допустимые значения выходных параметров оговариваются нормативными документами – стандартами, техническими условиями.

Технический параметр – физическая характеристика какого-либо устройства, явления или процесса (размер, скорость, давление, температура и т. д.). Параметры делятся на входные, внутренние и выходные. Входные (внешние) параметры определяют внешние требования к техническому объекту (процессу). Внутренние параметры отражают состояние и свойства самого технического объекта (процесса), их характеристики задаются (определяются) в процессе проектирования. Часть заданных входных и рассчитанные внутренние параметры технического объекта (процесса) могут быть использованы в качестве исходных данных для другого, взаимосвязанного объекта (процесса). Такие параметры называются выходными параметрами.

В зависимости от того, характеризует параметр реальный объект (процесс) или же его модель, его называют действительным или нормированным.

Нормированный параметр – теоретическая характеристика объекта (процесса), установленная нормативно-техническими документами, выражается предельными допустимыми значениями параметра. Изделие, параметры которого находятся внутри этого заданного интервала, считается работоспособным и может использоваться по назначению.

Действительный параметр (действительное значение параметра) – характеристика конкретного реального объекта. Его определяют путем испытаний или измерений с заданной точностью.

Контроль качества (*Quality Control*) – стандарт ISO 9000:2000 дает определение *quality* как «совокупность определенных характеристик и свойств товара или услуги удовлетворять обозначенные потребности». Контроль качества – любая плановая и систематическая деятельность, проводимая на предприятии

(в производственной системе) для обеспечения стабильного уровня качества выпускаемой продукции, то есть ее соответствие установленным требованиям клиентов (стандартам). Может включать как контроль изделия (проекта), так и проверку процесса изготовления или ремонта. В зависимости от объема производимых контрольных мероприятий может быть сплошным или выборочным. В узком смысле означает сравнение фактической характеристики объекта (продукции) с заданной, при котором выясняется, в какой мере продукты удовлетворяют установленным к ним требованиям. Важно, чтобы выбранные характеристики были измеряемы и могли контролироваться. К ним могут относиться физические величины (вес, температура, плотность), а также характеристики, имеющие отношение к торговле (цена, количество, размер упаковки). Характеристики могут быть различными, две основные подгруппы – это качественные (например, цвет) и количественные (например, масса). Каждая из характеристик может определяться либо точно, либо иметь определенный интервал, могут оговариваться допустимые отклонения.

Техника (от др.-греч. τεχνικός, от τέχνη – искусство, мастерство, умение) – обобщающее наименование технических средств (средств труда), к которым относятся все объекты, ранее не существовавшие в природе, изготовленные человеком для осуществления какой-либо деятельности (машины, механизмы, оборудование, аппараты, приспособления, инструменты, приборы и т. д.). Техника разрабатывается и совершенствуется в результате инженерной деятельности. Особенности конструирования и изготовления технического устройства зависят от его вида, требований к техническим характеристикам (производительности, надежности, экономичности, долговечности и т. д.), качеству, стоимости и пр. Современная техника является продуктом научно-технической революции, а уровень развития техники является показателем научно-технического развития общества.

Надежность системы (устройства, объекта) – способность выполнять заданные функции в заданных режимах и в определенных условиях эксплуатации с сохранением значений всех параметров в установленных пределах (показатели производительности, мощности, экономичности, прочности, точности и т. д.). Надежность – комплексная характеристика, которая в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств

Безотказность – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, то есть на протяжении всего времени эксплуатации (при действующей системе технического обслуживания и ремонтов).

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения выходных параметров в пределах, регламентированных нормативно-технической документацией.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы: например, поломка зуба, предельный износ подшипника, выход за допустимые пределы показателей производительности компрессора.

Отказы классифицируют по следующим признакам:

- по характеру возникновения (постепенные и внезапные),
- по признаку последствий (параметрические и функционирования),
- допустимые и недопустимые.

~ **внезапный** – наступает в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, совместное действие которых превышает возможности системы. Наступает без предшествующих симптомов разрушения, возникновение не зависит от длительности предшествующей работы. Например, заедания в редукторе из-за перебоев в подаче смазки.

~ **постепенный** – возникает в результате старения элементов и машины в целом, его основной признак – зависимость от длительности предшествующей работы. Постепенный отказ вызывается процессами изнашивания, усталости, старения, коррозии и др. Вероятность такого рода отказа растет с увеличением срока службы изделия.

Внезапные отказы отдельных элементов, как правило, приводят к отказу всей системы, постепенные отказы отдельных элементов могут и не иметь таких последствий.

Внезапные отказы, как правило, статистически независимы, в то время как постепенные отказы элементов обычно статистически связаны.

~ **параметрический** – приводит к выходу служебных параметров машины за допустимые пределы, т. е. изделие не выходит из строя, но оказывается неработоспособным по требованиям нормативных документов (нарушение точности станка, падение производительности насоса).

~ **функционирования** – приводит к невозможности функционирования изделия; может быть постепенным (потеря мощности двигателя со временем приводит к невозможности движения судна в штормовых условиях) и внезапным (выход из строя турбины из-за разрушения диска).

~ **допустимые отказы** – результат процессов старения, приводящие к ухудшению выходных параметров. Такие отказы невозможно предотвратить, можно только отдалить их появление.

~ **недопустимые отказы** – результат ошибок в проектировании, производстве и эксплуатации. Их почти всегда можно избежать, а появление недопустимых отказов – признак недостаточной профессиональной компетентности проектантов, производителей и эксплуатационников.

2.2. Классификация причин отказов по стадиям создания новой техники

Причины отказов формируются на разных стадиях создания новой техники. На рис. 1.10 показаны стадии возникновения причин отказов. Анализ схемы показывает, что подавляющее количество отказов имеют причины, заложенные на стадиях изготовления, сборки и монтажа. С этой точки зрения чрезвычайно важным становится объединение на общей методологической основе трибологии и технологии машиностроения, особенно разделов, которые непосредственно связаны с обеспечением оптимальной износостойкости и прочности пар трения.

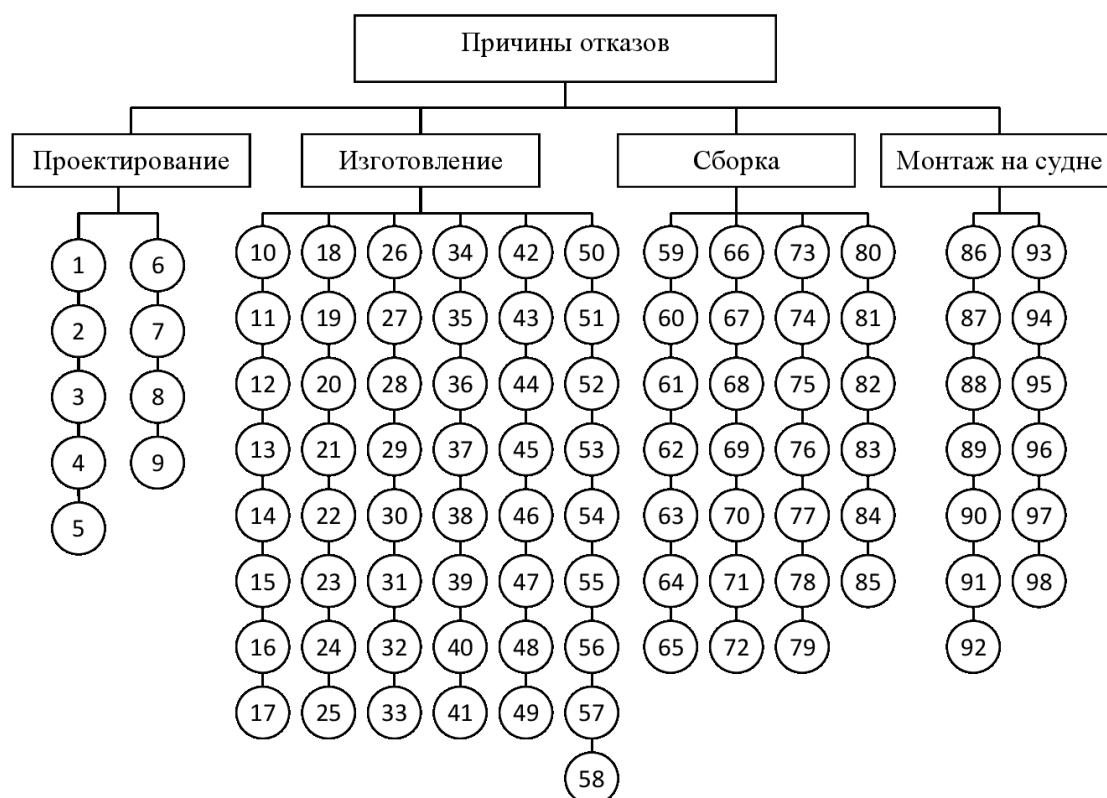


Рис.1.10. Классификация причин отказов по стадиям создания новой техники

1 – неудачная форма детали (поверхности); 2 – резкое изменение сечения; 3 – острые края; 4 – неудачный выбор материала; 5 – неудачное сочетание материала в контакте; 6 – сильно различающиеся коэффициенты линейного расширения материалов; 7 – недооценка нагрузки; 8 – сильные флуктуации нагрузки; 9 – неверный метод расчета на прочность; 10 – ошибка в технологической документации; 11 – неверный выбор инструментального материала; 12 – неверная документация на заготовку; 13 – неверный выбор способа получения заготовки; 14 – неправильное назначение припусков; 15 – неверное расчленение на этапы; 16 – неправильное размещение в техпроцессе операций упрочнения; 17 – неверно выбранные операции упрочнения; 18 – неверно выбранные профилирующие (окончательные) методы обработки; 19 – неверно назначенные режимы обработки; 20 – дефекты на окончательной обработке (например, прижоги шлифования); 21 – неверно полученная (непроконтролированная) шероховатость; 22 – неверное значение твердости; 23 – неверное сочетание твердости поверхности и сердцевины; 24 – неправильно применен инструмент; 25 – неверно обеспечена твердость приспособления; 26 – ошибки в наладке; 27 – неправильно выбрана СОЖ; 28 – ошибки в контроле; 29 – получение обезуглероженного слоя; 30 – получение наводороженного слоя; 31 – перенаклеп поверхностей; 32 – получение остаточных напряжений растяжения; 33 – коробление поверхностей; 34 – неверно применены люнеты; 35 – получение волнистости на поверхности; 36 – β -структура в латуни и бронзе; 37 – ϵ -фаза в азотированном слое; 38 – плохие механические свойства заготовки; 39 – неверный метод отливки; 40 – наличие полости; 41 – расслоение; 42 – местная усадка; 43 – микропористость; 44 – смещение стержня; 45 – неметаллические включения; 46 – газовые пузыри; 47 – закаты складки; 48 – окисные пленки; 49 – неверное расположение зерна; 50 – чрезмерная холодная обработка; 51 – поверхностные трещины; 52 – неверная тепловая обработка; 53 – перегрев; 54 – недогрев; 55 – несоответствующая закалка, химико-термическая обработка; 56 – неверно оформлены пазы, вырезы, галтели; 57 – неверно выполнено фланкирование; 58 – неверные тонкие покрытия; 59 – неправильное соединение; 60 – неправильная подгонка; 61 – неправильная клепка; 62 – плохое сверление; 63 – неверная сварка; 64 – неправильная пайка; 65 – перепутан состав припоя; 66 – включения флюса в паяном соединении; 67 – окисление или непровар шва; 68 – растрескивание заливки подшипника; 69 – отслаивание; 70 – неверная расточка отверстия подшипника; 71 – недостаточное прилегание вкладыша к корпусу; 72 – недостаточная степень контакта; 73 – излишний натяг; 74 – излишний зазор; 75 – неверный рабочий зазор; 76 – неверная осевая игра подшипника качения; 77 – перетяжка; 78 – повреждение рабочей поверхности; 79 – искажение фор-

мы; 80 – следы инструмента; 81 – остатки грязи, масла; 82 – недостаточное затягивание; 83 – разные резьбы; 84 – неверные допуски; 85 – замена бракованной деталью; 86 – перераспределение перемещений в размерной монтажной цепи по сравнению со сборочной; 87 – погрешности в связи с нежесткостью корпуса; 88 – влияние корпуса судна (в грузу, порожнем, односторонний солнечный нагрев); 89 – прицентровка нежесткого вала к жесткому; 90 – монтаж на стапеле; 91 – монтаж на плаву; 92 – ошибка в размерах клиньев; 93 – неравномерная усадка пластмассы; 94 – неверно пробита центровая линия валопровода; 95 – неверно снята расточка ахтерштевня; 96 – неверно произведена расточка; неверно поставлены сальники уплотнений; 97 – неправильный монтаж; 98 – неправильный контроль монтажных работ

ГЛАВА 3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ТРИБОТЕХНОЛОГИИ

Согласно классификации причин отказов (см. *Отказов классификация*) механических систем подавляющее число отказов имеют причины, заложенные на стадиях изготовления, сборки и монтажа изделий; что и обуславливает необходимость усиления позиций технологии в создании долговечных пар трения.

Триботехнология – научное направление, объединяющее предмет, задачи, идеи и методы *трибологии* и *технологии* в единый комплекс на единой методологической основе с целью обеспечения долговечности машин и их элементов на стадиях проектирования, производства и эксплуатации. В область изучения Т. входят разделы: микро- и макропрофилирование поверхностей трения, различные методы упрочнения, композиционности поверхностных слоев, притирка, обкатка и приработка поверхностей трения, компенсация, регулирование износа, восстановление изношенных деталей и т. д. Основная задача триботехнологии – исследование и создание оптимальных трибоповерхностей, пар трения на основе дифференциального распределения триботехнологического качества и систем пар трения, обеспечивающих заданную надежность и долговечность механических систем. Оптимальное рабочее состояние пары трения можно получить лишь при решении оптимизационной задачи выбора материалов, методов упрочнения рабочих поверхностей, методов создания нужного макро- и микрорельефа (с учетом изменения этих параметров в процессе эксплуатации), смазки и системы смазки [1, 41, 46].

Трибология, т р и б о л о г и я – наука о трении и процессах, сопровождающих трение. Охватывает экспериментально-теоретические исследования физических, химических, биологических и других явлений, связанных с трением. Основные разделы и направления развития трибологии [3, 6, 10, 21, 43, 44, 48]:

1. Физико-химическая механика контактного взаимодействия твердых тел при качении, скольжении и ударе с учетом влияния среды.
2. Учение о площадях фактического и контурного контакта.
3. Исследование сухого и граничного трения и создание расчетных методов оценки.
4. Гидродинамика и эластогидродинамика.

5. Исследование изнашивания и разработка методов расчета деталей на износ.

6. Теплофизика и тепловая динамика трения и изнашивания.

7. Системный анализ и моделирование трения и изнашивания.

8. Научные основы создания износостойких фрикционных и антифрикционных материалов.

Триботехника – технические средства, то есть изделия, узлы и входящие в них детали, необходимые для осуществления функционирования какой-либо механической системы, осуществляемого путем контактирования и взаимного относительного движения сопрягаемых тел по заданным законам кинематики и динамики в условиях трения.

Технология (от др.-греч. τέχνη — искусство, мастерство, умение; λόγος — «слово», «мысль», «смысл», «понятие») – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств и формы полуфабриката или изделия. Задачей технологии является нахождение физических, химических, механических и др. закономерностей с целью выявления и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов. Технология получения различных металлов основана на изменении химического состава, химических и физических свойств исходного сырья, технология механической обработки связана с изменением формы и некоторых физических свойств обрабатываемых деталей. Предметом исследования и разработки в технологии машиностроения являются основы проектирования технологического процесса (виды обработки, выбор заготовок, качество поверхности обрабатываемых изделий, точность обработки и припуски на нее, базирование заготовок), способы обработки поверхностей (плоских, фасонных и др.), методы изготовления типовых деталей (корпусов, валов, зубчатых колес и др.), процессы сборки, основы конструирования приспособлений. Технология обновляется и изменяется по мере развития техники. Основные направления развития: переход от прерывистых (дискретных, циклических) технологических процессов к непрерывным поточным процессам; внедрение «замкнутой» (безотходной) технологии, снижение негативного воздействия на окружающую среду.

3.1. Машина с позиций триботехнологии

3.1.1. Главные пары трения и пары минимального ресурса

Пара трения, **фрикционная пара** – система из двух элементов (материал трения и контртело), контактирующие поверхности которых в процессе работы перемещаются относительно друг друга. Характеризуется материалом и упрочнением поверхностей, макро- и микрогеометрией, средой в контакте, в том числе смазочным материалом. Основные параметры, определяющие работу пары трения: износостойкость, коэффициент трения, несущая способность. Исходя из принципа адекватности (см. *Триботехнологии принципы*), машина представляется как взаимосвязанная и взаимодействующая система пар трения, среди которых выделяют: главные пары трения; пары минимального ресурса; вспомогательные пары трения.

Главными называют пары трения, непосредственно влияющие на технико-экономические показатели изделия. Например, пара трения «гильза цилиндра – поршневое кольцо» в ДВС прямо влияет на мощность двигателя.

Вспомогательные – пары, непосредственно не влияющие на технико-экономические показатели.

Пары минимального ресурса – те, которые определяют ресурс изделия по отказам функционирования или параметрическим.

Главная задача триботехнологического проектирования – определение (или назначение) пар минимального ресурса, конструкторское и технологическое обеспечение их трибологическими качествами, соответствующими заданному ресурсу механической системы.

3.1.2. Гипотетически оптимальный рабочий слой, гипотетически оптимальные пары трения

Долговечность пары трения определяется рядом условий, прежде всего она зависит от работоспособности рабочих слоев тела и контртела, а также смазочного материала

Непосредственно на долговечность рабочего слоя влияют его геометрические и физико-механические качества: макропрофиль, шероховатость, способность к контактированию (оцениваемая по пятнам контакта и по опорным кривым), механические свойства, в том числе твердость и остаточные напряжения, структура, способность к смазываемости, к образованию вторичных структур и т. д.

Рабочий слой непосредственно воспринимает силы трения, но его нельзя рассматривать изолированно от сердцевины, так как только при оптимальном сочетании их свойств обеспечиваются оптимальные эксплуатационные показатели. Причем в каждом конкретном случае оптимальным будет определенный набор свойств рабочего слоя, соответствующий оптимальным эксплуатационным характеристикам: износостойкости, несущей способности, надежности.

Оптимальная структура рабочего слоя – набор прослоек, составляющих рабочий слой поверхности трения, трибологические свойства которых оптимально отвечают их функциональным задачам. Она должна сочетать определенные геометрические и физико-механические качества (макропрофиль, шероховатость, твердость, остаточные напряжения, структура, способность к смазыванию, образованию вторичных структур). Оптимизационная задача отыскания оптимальной структуры рабочего слоя предполагает многовариантность возможных решений. На рис. 1.11, *а* представлены структуры рабочих слоев, наиболее приспособленных для случаев трения скольжения (опоры, направляющие, подшипники скольжения), на рис. 1.11, *б* – трения качения со скольжением (зубчатые колеса). Долговечность упрочненного рабочего слоя (*б*) во многом зависит от сочетания твердости упрочненной прослойки (В), переходной зоны (Г) и сердцевины (Д). Особое внимание уделяют: соотношению твердостей в связи с возможным продавливанием упрочненного слоя при недостаточно прочной сердцевине; расположению максимальных значений касательных напряжений ($\tau_{\max}$) в упрочненных слоях, особенно при больших значениях приведенного радиуса кривизны (крупногабаритные зубчатые колеса) [46].

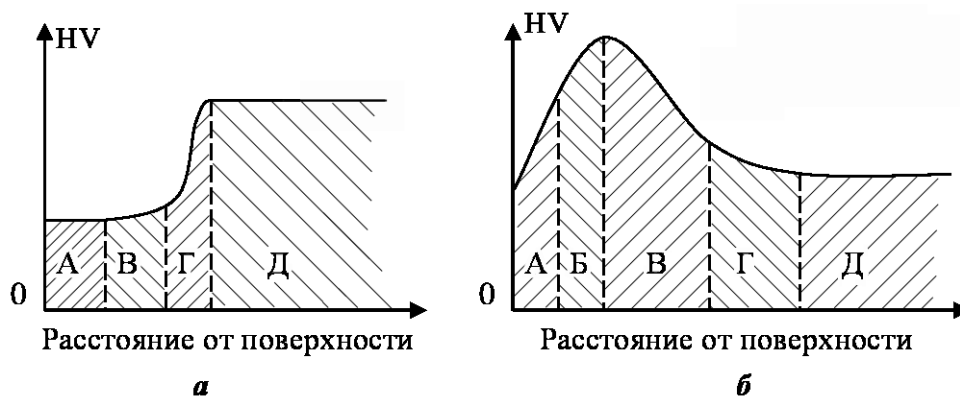


Рис. 1.11. Структура рабочего слоя:
а – антифрикционный слой; *б* – упрочненный слой
 А – приработочная прослойка; Б – переходная прослойка I;
 В – упрочненная (антифрикционная) прослойка;
 Г – переходная прослойка II; Д – сердцевина (основа)

Оптимальная пара трения – пара трения, обеспечивающая наиболее эффективную эксплуатацию узла в заданных условиях. Задача создания оптимальной пары трения предполагает многовариантность возможных решений: конструктивных (путем подбора оптимальной конструкции узла, смазочных материалов, систем смазывания, режимов работы и т.д.) и технологических (путем использования в паре трения различных сочетаний материалов, технологий макро- и микропрофилирования, упрочнения). Контактное взаимодействие можно подразделить на: **адаптивное** (поддающееся приработке) и **технологическое** (в условиях гидродинамического режима трения, полностью исключающего металлический контакт). Адаптивное контактирование проявляется при граничном и полужидкостном трении. Обеспечение работоспособности таких поверхностей и пар трения требует соответствующего триботехнологического качества поверхностей и переходной зоны: а) одна из трибоповерхностей контакта имеет структуру Шарпи (см. *Шарпи принцип*); б) одна или обе трибоповерхности контакта имеют диффузионные, химические или плакированные адаптационные слои; в) смазочный материал содержит присадки адаптационного назначения.

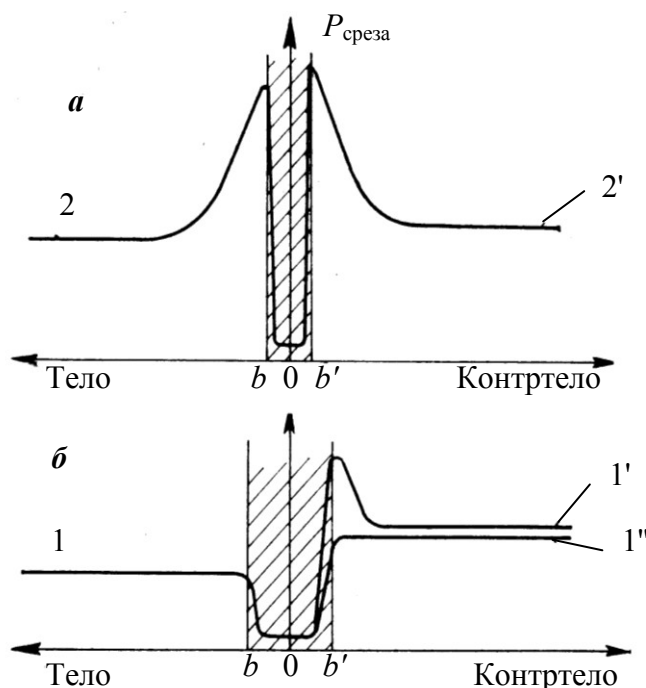
При проектировании трибоконтакта определенного триботехнологического качества переходную зону представляем в виде сплошной среды, включающей в себя поверхностные слои тела, контртела, слои смазки, технологические слои с положительным градиентом механических свойств, специально создаваемые на одном из тел пары (или на обоих), и слои вторичных структур, образуемые на поверхностях в процессе трения и износа под воздействием нагрузок, скоростей, температур и сред, см. рис. 1.12.

Триботехнологическое качество переходной зоны контакта должно отвечать определенным требованиям в зависимости от вида трения и нагруженности. Чтобы в паре трения протекало оптимальное изнашивание, переходная зона контакта должна иметь положительный градиент механических свойств.

Кроме переходной зоны с положительным градиентом механических свойств, структура долговечного контакта должна иметь существенно упрочненные слои для условий работы, характеризующихся высокими контактными нагрузками при трении качения со скольжением (см. рис. 1.12, *а*) либо существенно антифрикционные слои (типа баббита, бронзы и т. п.) для условий работы при трении скольжения с низкими и средними контактными нагрузками (см. рис. 1.12, *б*).

Рис. 1.12. *Оптимальная пара трения.*
Оптимальная структура контакта пары трения:

a – контакт при трении качения (со скольжением) твердых упрочненных поверхностей; *б* – контакт при трении скольжения.
1 – тело имеет структуру, построенную по принципу Шарпи; 1' – контртело с упрочненным поверхностным слоем; 1'' – контртело без поверхностного упрочнения;
2 и 2' – соответственно тело и контртело с упрочненными поверхностными слоями;
b и *b'* – границы переходной зоны контакта;
0 – нейтральная поверхность контакта



3.2. Триботехнологические принципы создания новой техники

Триботехнологическое качество – комплексная характеристика поверхности трения, совокупность свойств, характеризующихся геометрическими, физико-механическими, химическими параметрами, приобретенными на технологическом этапе и отвечающих *принципам триботехнологии*. Задается на этапе проектирования и обеспечивается технологическими методами на стадии анализа триботехнологичности и изготовления механической системы.

Триботехнологическая рентабельность – оптимизация затрат на этапах изготовления и эксплуатации пары трения: с увеличением рациональных затрат на технологическом этапе уменьшаются расходы на эксплуатацию и наоборот (рис. 1.13).

Резервирование (от лат. *reservo* – сберегаю, сохраняю) – метод повышения надежности объекта путем введения избыточности (структурной, функциональной, информационной и временной). *Избыточностью* называют наличие у объекта свойств и возможностей сверх тех, какие необходимы для нормального функционирования. Если резерв отсутствует, отказ любого рабочего элемента одновременно приводит к отказу объекта (изделия) в целом.

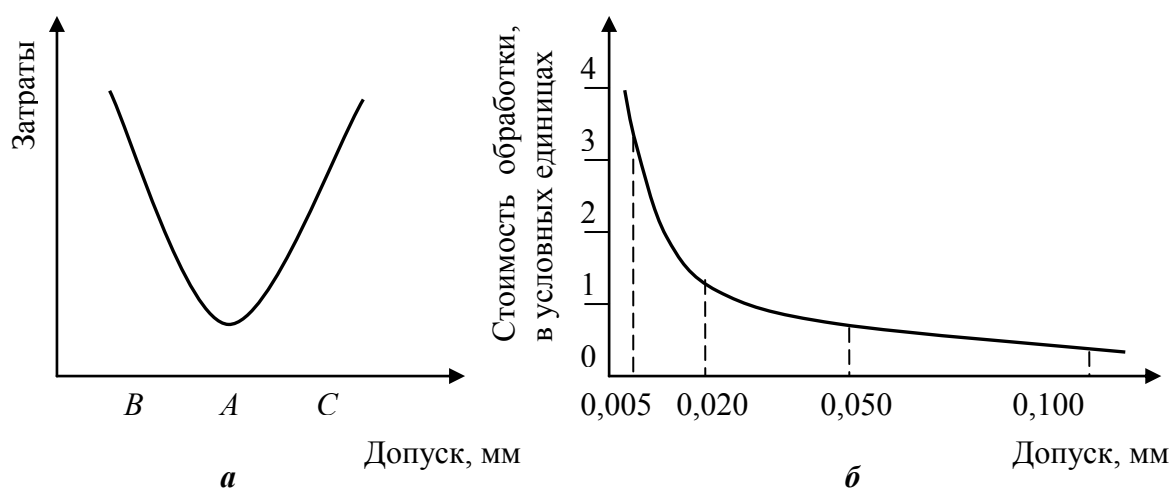


Рис. 1.13. Влияние точности на затраты производства и эксплуатацию изделия:
а – функция затрат на эксплуатацию; *б* – функция затрат на производство

Резервирование триботехнологического качества, «интеллектуальное резервирование» – придание поверхностям трения (в целом – контакту) специфических свойств, проявляющихся в процессе эксплуатации по мере изменений в условиях работы контактов пар трения (см. *Критические точки, Критические параметры*). В простейшем варианте резервирования трибосистема состоит из двух элементов: рабочий поверхностный слой и резервная компонента. В произвольный момент времени t работоспособная система может находиться в одном из двух состояний: исправном (поверхностный слой работает, резервная компонента – в бездействии); субисправном (поверхностный слой накануне перехода в состояние критического изнашивания, резервная компонента – вступает в действие). При этом наблюдаются два случая: либо поверхностный слой во время работы резервной компоненты восстанавливается, либо восстановление исходного состояния трибосистемы не предусмотрено, резервная компонента лишь предотвращает развитие критического изнашивания и сигнализирует об отказе рабочего поверхностного слоя.

Вероятность нахождения системы в момент t [(в интервале $(0, t)$] в исправном состоянии – вероятность безотказной работы элемента 1 (исходного поверхностного слоя) за время t – $P(t) = P_1(t)$. Вероятность отказа элемента 1 в момент τ ($\tau < t$) и исправной работы элемента 2 в интервале (τ, t) , т. е. вероятность триботехнологического резервирования $P_p(t) = \int_0^t f_1(\tau)P_2(t - \tau)d\tau$. Приняв показательное распределение времени работы до отказа и подставляя в зависимости вместо $f(t)$ и $P(t)$ их значения $P(t) = e^{-\lambda_1 t}$; $P_p(t) = \frac{\lambda_1(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}$. В

случае равнонадежности элементов 1 и 2 ($\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$) $P(t) = e^{-\lambda t}$; $P_p(t) = \lambda t e^{-\lambda t}$. Интенсивность случайных отказов λ зависит от нагруженности поверхностного слоя и в общем случае $\lambda_i = \lambda_0 k_d k_T k_K$, где λ_0 – значение интенсивности отказов в лабораторных условиях испытаний трибосистемы; k_d – коэффициент динамичности; k_T – коэффициент, учитывающий температуру в контакте; k_K – коэффициент, учитывающий возможные изменения в контакте (химические, диффузионные). Резервирование триботехнологического качества считается достаточным при соблюдении условия, что во время действия элементов 1 и 2 в контакте имеется переходная зона с положительным градиентом механических свойств.

В практике проектирования трибосистем встречается и другой тип резервирования, когда приемлемый вид трения и износа достигается назначением режимов недогрузки, что противоречит идее ресурсосбережения [33, 41, 46].

Дополнение триботехнологического качества – триботехнологическая методология проектирования и изготовления деталей (узлов, машин) с различными физико-механическими свойствами, адекватными характеру внешних воздействий. Например, обод сборного зубчатого колеса изготавливают из стали 38ХМЮА и азотируют (что обеспечивает повышение износостойкости), а ступицу – из стали 40Х (более дешевый материал, однако обеспечивающий прочность колеса) [33, 46].

Принцип адекватности – надежность механической системы адекватна надежности ее системы пар трения. В системе имеются главные пары трения (ГПТ), обеспечивающие основной технический параметр машины и пары трения минимального ресурса (ПТМР), определяющие долговечность механической системы. Ресурс по параметрическому отказу зависит от долговечности ГПТ; по функциональному отказу – от долговечности ПТМР. Принцип адекватности не приемлем для механических систем, отказы которых не связаны с триботехнологией.

Принцип адаптивности – система пар трения машины должна обладать свойством оптимальной приспособляемости к начальным эксплуатационным нагрузкам и условиям ресурсной работы. Адаптивность поверхности трения проявляется в достижении оптимальных значений контурных площадей (пятен контакта) и микрогеометрии на них в период приработки.

Принцип согласия состоит в следующем – воздействующие на механическую систему факторы (силовые и тепловые поля, агрессивность среды и т. п.),

режимы и условия работы должны соответствовать триботехнологическому качеству системы пар трения.

Принцип резервирования триботехнологического качества – система пар трения, как и отдельная поверхность трения, должна обладать оптимальным резервом триботехнологического качества, проявляющимся в процессе эксплуатации по мере изменений в нагруженности и условиях работы пар трения. На практике встречаются два вида резервирования. **П а р а м е т р и ч е - с к о е** резервирование предполагает проектирование трибоповерхностей, работающих в режиме недогрузки, что и обеспечивает приемлемый вид трения и износа на любых эксплуатационных режимах. **С т р у к т у р н о е** резервирование относится к «интеллектуальному» виду. Такие структурные резервы при штатной работе и абсолютной надежности исходных элементов системы не являются функционально необходимыми, но при переходе некоторых предельных значений нагруженности (давлений, температур и т. п.), с целью предотвращения адекватного перехода к критическому (патологическому) виду износа, вступают в действие резервные структурные составляющие поверхностных слоев или смазки.

Принцип структурной оптимальности контакта – триботехнологические поверхности и контакт в целом должны иметь оптимальный набор рабочих прослоек (структур) и переходных зон определенного триботехнологического качества, отвечающий условиям эксплуатации трибосистемы и эксплуатационным характеристикам: износостойкости, несущей способности, надежности.

Принцип организации процесса трения – каждой паре трения объективно присущи оптимальные виды трения, износа и смазки. Проектирование процесса трения заключается в определении альтернатив: трение качения – трение скольжения; гидродинамическая (гидростатическая) – граничная смазка; режим избирательного переноса при трении; традиционное смазывание – импульсное смазывание; обеспечение нагруженности (p , v , ϑ) соответствующим триботехнологическим качеством и т.п. Одна из самых первых и главных задач – выбор для пар трения основного и сопутствующих видов изнашивания и определение главных направлений обеспечения долговечности пары трения.

Принцип интегральности трибологической системы – система пар трения машины должна обладать необходимой и достаточной общностью триботехнологического качества, обеспечивающей заданный ресурс по долговеч-

ности и ремонтпригодности на основе пропорциональной долговечности подсистем.

Принцип дифференцированного распределения триботехнологического качества – в механической системе триботехнологическое качество должно быть создано на трибоповерхностях и в контактах в соответствии с принципами согласия на основе методологии дополнения триботехнологического качества. Возможно распределение триботехнологического качества на поверхности (дифференцированное упрочнение, дифференцированное микропрофилирование), на детали (например, цементация боковых поверхностей зубьев зубчатого колеса или микропрофилирование рабочей поверхности подшипников скольжения), сборочной единицы (например, составные азотированные зубчатые колеса), механической системы в целом.

3.3. Технологическая и эксплуатационная эволюция качества поверхности, его основных характеристик и состояния

В технике под **поверхностью детали** понимают наружный слой, который по строению и другим физико-механическим свойствам отличается от внутренней части детали.

Качество поверхности – комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате обработки. Определяется геометрией поверхности как границей тела и физико-химико-механическими свойствами, обусловленными процессами ее образования при обработке детали. Качество поверхности деталей машин влияет на сопротивление усталости, износо-, коррозионную и эрозионную стойкость, и связано с такими свойствами сопряжений, как прочность посадок с натягом и плотность подвижных и неподвижных соединений.

Топография поверхности трения – совокупность параметров, характеризующих рельеф и строение поверхностных слоев до и после трения. Топография поверхности, полученная технологической обработкой (см. *Технологический рельеф*), в результате пластической деформации, структурных и фазовых превращений трансформируется в *эксплуатационный рельеф*.

Технологический рельеф, и с х о д н ы й р е л ь е ф – рельеф поверхности (*макрогеометрия, микрогеометрия и волнистость*), образующийся в результате механической обработки. *Шероховатость* обусловлена геометрией и материалом режущего инструмента, режимами обработки, механическими свойствами обрабатываемого материала, волнистость – систематическими погрешно-

стями технологической системы (системы СПИД). Оптимальный технологический рельеф должен обеспечивать: эпюру напряжений, обуславливающую образование новых поверхностей при минимальном разрушении и равномерном упрочнении поверхностного слоя; локализацию деформаций в тонких поверхностных слоях; максимальное соответствие рельефу, образующемуся при работе данного сопряжения.

Эксплуатационный рельеф – технологический рельеф трибоповерхностей, трансформировавшийся в конкретных условиях эксплуатации. Формируется в начальный период работы трибоповерхности в результате воздействия факторов: нагрузки (величина и характер нагружения, многократность приложения нагрузки, напряжения и деформации на участках непосредственного контакта и в зонах влияния и т. д.); рабочей среды (наличие пленок окислов, поверхностно-активных веществ, адсорбированных смазочных слоев, вторичных структур различного химического состава); структуры поверхностных слоев. На начальный период формирования решающее значение оказывает технологический (исходный) рельеф. Впоследствии, независимо от количественных параметров технологического рельефа, после **приработки** в одинаковых условиях устанавливается один и тот же рельеф – оптимальный для данных условий, характеризующий установившийся процесс трения. Новая шероховатость может быть как больше, так и меньше первоначальной [14].

При технологической обработке (резание, шлифование и др.) происходит интенсивная пластическая деформация металла, в его локальных объемах возникают высокие температуры, поверхность металла испытывает интенсивное физико-химическое воздействие рабочих сред, СОЖ, кислорода воздуха. В этих условиях поверхностные слои металла глубиной от долей до десятков микрон резко изменяют свои свойства. Иногда применяют специальные методы для изменения свойств в заданном направлении. К таким методам относятся азотирование, цементация, хромирование, борирование, закалка, накатка и др.

При нагружении трением тонкие поверхностные слои находятся под многократным воздействием нормальных и тангенциальных напряжений и нагреваются до значительных температур. Особое значение в этих условиях имеют рабочие среды в зоне контакта. Механические и физико-химические свойства тонких поверхностных слоев и основного металла резко отличаются. Под воздействием пластических деформаций возникает неравновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, что вызывает активизацию по-

верхностных объемов металла и развитие явлений диффузии. Это приводит к ускоренному образованию вторичных защитных структур – чаще всего это пленки окислов, а также сульфидные и фосфидные пленки, а также особые слои смазки, обладающие квазиупругими свойствами (рис. 1.14).

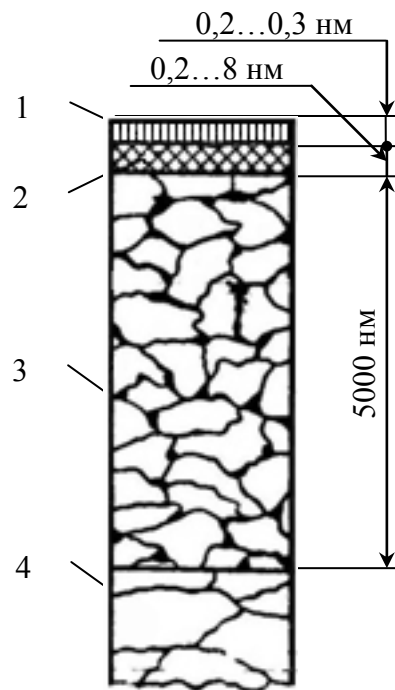


Рис. 1.14. Структура поверхностного слоя шлифованной детали:

1 – граничный слой, адсорбированной пленки газов, влаги и СОЖ; 2 – деформированный металл с искаженной решеткой кристаллов, окислы, пустоты, трещины; 3 – слой, структурированный под воздействием тангенциальных сил и давления шлиф. круга; 4 – исходный металл

3.3.1. Геометрия поверхности

Реальная деталь всегда отличается от идеальной геометрической формы. Эти отличия, то есть отклонение параметров реальных поверхностей детали от заданных на чертеже, называются **погрешностью**.

Макрогеометрическими (или погрешностью формы) называют отклонения, при которых форма поверхности отклоняется от заданной. Источник макрогеометрических погрешностей поверхности – неточности металлообрабатывающего оборудования, погрешности установки заготовки, силовые и температурные деформации технологической системы (системы СПИД) и износ инструмента в процессе обработки.

Волнистость поверхности – совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышений и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту. Образуется в результате неравномерности подачи при точении и шлифовании, неплоскостности направляющих и вынужденных колебаний технологической системы, возникающих из-за неравномерности силы резания, наличия неуравновешенных масс и т. д.

Шероховатость поверхности – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой дли-

ны l . Источник шероховатости – пластические деформации поверхностного слоя детали вследствие образования стружки, копирование неровностей режущих кромок инструмента и трение его о деталь, вырывание с поверхности частиц материала и др. Шероховатость определяет качество обработанной поверхности и влияет на эксплуатационные свойства деталей: износостойкость, коррозионную стойкость, коэффициент трения, прочность неподвижных соединений и т. д. Шероховатость поверхности можно оценивать количественно одним или несколькими параметрами (рис. 1.15):

- среднее арифметическое отклонение профиля Ra – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины

$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$, где n – число выбранных точек профиля на

базовой длине ($Ra = 100 \dots 0,008$ мкм);

- высота неровностей профиля по десяти точкам Rz – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$Rz = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right]$, где y_{pi} – высота i -го наибольшего выступа, y_{vi} – глубина

i -ой наибольшей впадины профиля ($Rz = 1600 \dots 0,025$ мкм);

- средний шаг неровностей S_m – среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины $S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$, где

n – число шагов в пределах базовой длины l , S_{mi} – шаг неровностей профиля, равный длине отрезка средней длины, пересекающей профиль в трех соседних точках и ограниченной двумя крайними точками ($S_m = 12,5 \dots 0,002$ мм), m – средняя линия профиля;

- средний шаг местных выступов профиля S – среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины ($S = 12,5 \dots 0,002$ мм);

- опорная длина профиля η_p – сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии;

- относительная опорная длина профиля t_p – отношение опорной длины профиля к базовой длине ($t_p = 10, 20, \dots, 80, 90$ %) (рис. 1.16);

- $Rmax$ – расстояние между линией выступов и линией впадин.

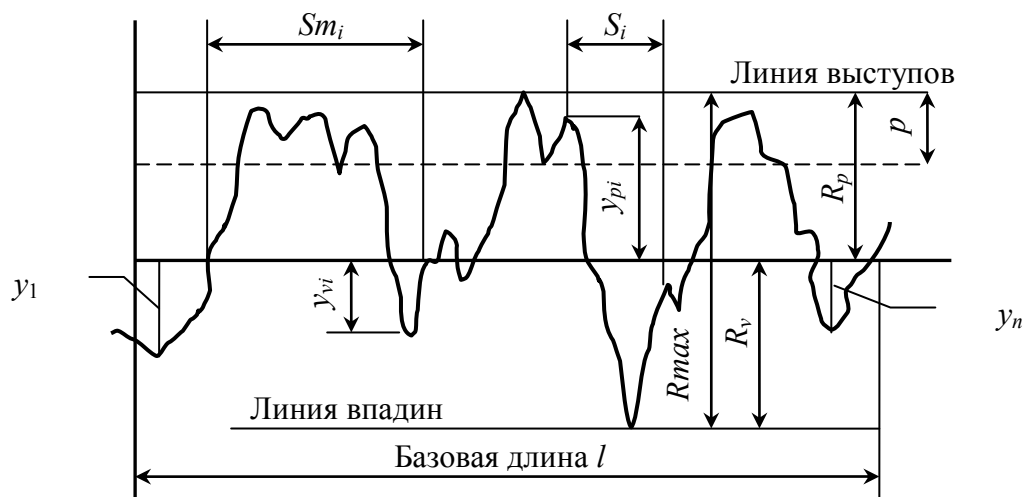


Рис. 1.15. Шероховатость

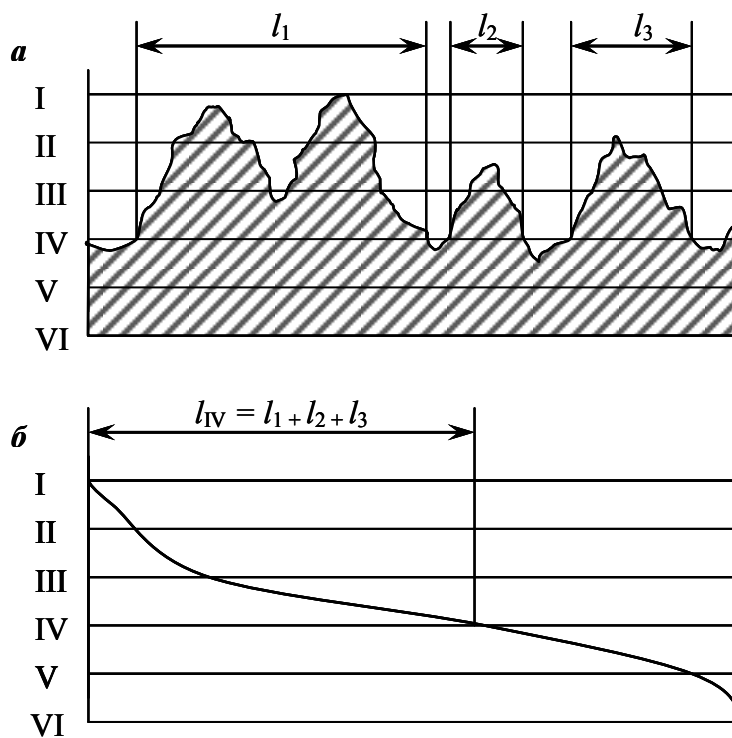


Рис. 1.16. Профильная кривая (а) и формирование кривой несущей поверхности (б)

К **качественным** параметрам шероховатости относятся вид обработки и направление неровностей (параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, кругообразное, радиальное, точечное, произвольное).

Кривая опорной поверхности – кривая, характеризующая форму неровностей профиля и величину опорной площади, образующейся под рабочей нагрузкой. По кривой опорной поверхности можно определить возрастание площади контакта по мере сближения тел. Опорная поверхность вычисляется на основании снятых с микрорельефа профилограмм. Для построения кривой опорной поверхности расстояние между линиями выступов и впадин делится

на несколько уровней сечения профиля, для каждого сечения определяют значение величины относительной опорной длины профиля и строят кривую изменения опорной длины профиля.

В таблице 1.4. представлены характеристики шероховатости, обеспечиваемые основными видами обработки различных типов поверхностей.

Таблица 1.4. Параметры поверхности после основных видов обработки

Обработка	Параметры шероховатости			
	Ra , мкм	S_m , мм	S , мм	t_{20} , %
Наружные поверхности вращения				
Шлифование:				
предварительное	1...2,5	0,063...0,20	0,032...0,160	10
чистовое	0,2...1,25	0,025...0,100	0,010...0,080	10
тонкое	0,05...0,25	0,008...0,025	0,003...0,160	40
Суперфиниширование	0,032...0,28	0,06...0,020	0,003...0,016	10
Полирование	0,008...0,08	0,008...0,025	0,002...0,08	10
Притирка	0,01...0,11	0,006...0,04	0,002...0,032	10...15
Обкатывание и выглаживание	0,03...2,0	0,025...1,25	0,025...1,25	10...70
Виброобкатывание	0,063...1,60	0,01...10,5	0,008...0,16	10...70
Внутренние поверхности вращения				
Шлифование:				
предварительное	1,6...3,2	0,063...0,25	0,032...0,16	10
чистовое	0,32...1,60	0,025...0,1	0,1...0,8	10
тонкое	0,08...0,32	0,008...0,025	0,003...0,016	10
Хонингование:				
предварительное	1,25...3,2	0,063...0,25	0,085...0,16	10
чистовое	0,25...1,25	0,02...0,1	0,008...0,08	10
тонкое	0,04...0,25	0,006...0,2	0,003...0,16	10
Хонингование плосковоершинное	0,04...1,20	0,013...0,34	0,006...0,08	10
Хонингование антифрикционное плосковоершинное	0,03...0,2	0,006...0,16	0,004...0,12	10
Хонингование антифрикционно-деформационное	0,1...1,6	0,01...0,25	0,005...0,2	10...15
Притирка	0,02...0,16	0,005...0,04	0,002...0,02	10...15
Раскатывание и выглаживание	0,05...2	0,025...1	0,025...1	10...70
Виброраскатывание	0,063...1,6	0,01...12,5	0,008...0,16	10...70
Хонингование антифрикционно-деформационное	0,1...1,6	0,01...0,25	0,005...0,2	10...15

Обработка	Параметры шероховатости			
	Ra , мкм	S_m , мм	S , мм	t_{20} , %
Притирка	0,02...0,16	0,005...0,04	0,002...0,02	10...15
Раскатывание и выглаживание	0,05...2	0,025...1	0,025...1	10...70
Виброраскатывание	0,063...1,6	0,01...12,5	0,008...0,16	10...70
Плоские поверхности				
Шлифование:				
предварительное	1,6...4	0,1...0,32	0,063...0,25	10
чистовое	0,32...1,6	0,025...0,125	0,0125...0,08	10
тонкое	0,08...0,32	0,01...0,032	0,005...0,025	10
Накатывание роликами и шариковыми головками	0,1...2	0,025...5	0,02...5	10...70
Вибронакатывание	0,16...2,5	0,025...12,5	0,02...5	10...70
Виброполирование	0,3...0,032	0,1...0,025	0,004...0,025	10
Притирка	0,02...0,1	0,008...0,04	0,004...0,032	10...15
Боковые поверхности зубьев				
Шлифование	0,5...1,25	0,04...0,1	0,025...0,063	10
Обкатывание	0,32...1	0,063...2	0,032...1,75	10...70
Притирка	0,1...0,5	0,032...0,5	0,02...0,16	10...70

Примечание: Для упрочняющей обработки $R_{max} = 5 Ra$; $Rz = 4 Ra$; для остальных видов обработки $R_{max} = 7 Ra$; $Rz = 5,5 Ra$.

Влияние технологии и режимов обработки на показатели геометрического качества обработанных поверхностей

Образование шероховатости после механической обработки происходит под действием двух одновременно проявляющихся факторов: **геометрического**, связанного с кинематикой стружкообразования и **упруго-пластического деформирования** снимаемого слоя и поверхностного слоя, остающегося после обработки.

Технологические факторы и их влияние на шероховатость:

Скорость резания – повышение скорости резания стали сопровождается наростообразованием и ухудшением качества поверхности. Дальнейшее повышение скорости ведет к увеличению температуры нароста и снижению его прочности и размера, при скоростях 60...70 м/мин нарост вообще не образуется, то есть перестает влиять на шероховатость поверхности. Дальнейшее увеличение скорости резания мало сказывается на шероховатости обработанной поверхности. При обработке хрупких материалов (чугун и др.) происходит выламывание частиц материала детали, нарост не образуется.

Подача – уменьшение подачи приводит к снижению шероховатости, но в некотором диапазоне ($S < 0,05$ мм/об и ниже) уменьшение подачи может увеличить Rz . Это связано с уменьшением толщины стружки и увеличением толщины упруго деформируемого участка. В этом случае при снижении подачи в несколько раз увеличивается удельная сила резания, а также повышается степень пластической деформации металла обрабатываемой поверхности и стружки, усадка стружки, нарост на резце, и, в результате, растет высота неровностей. Кроме того, при низких значениях подачи сложно поддерживать ее равномерность.

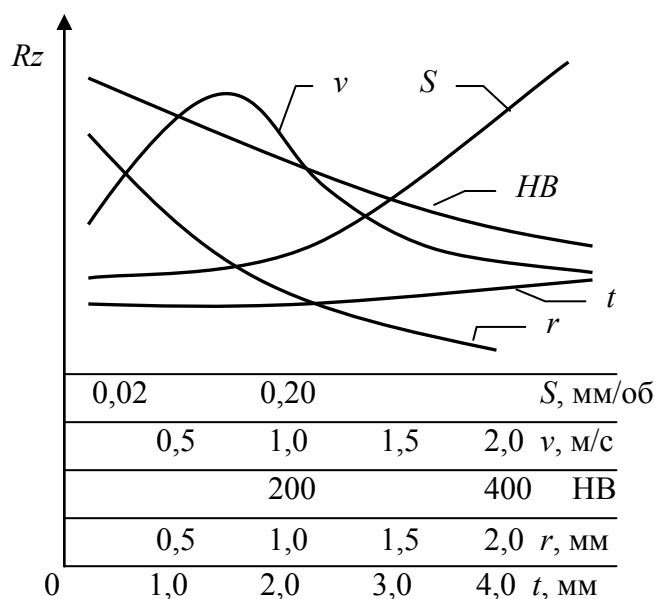


Рис. 1.17. Зависимость шероховатости от параметров резания

Глубина резания мало влияет на шероховатость обработанной поверхности. Существует определенная минимальная глубина резания $t_{\min}$ (0,02...0,03 мм), зависящая от радиуса скругления лезвия, свойств обрабатываемого материала и скорости резания. Если $t > t_{\min}$, то происходит резание, а при $t < t_{\min}$ – только упругое и пластическое снятие металла. С увеличением скорости резания $t_{\min}$ уменьшается.

Общая картина зависимости шероховатости от параметров резания представлена на рис. 1.17.

3.3.2. Физико-химико-механические свойства поверхностных слоев.

Структура поверхностного слоя поверхностей трения и эволюция в процессе приработки и эксплуатации

Модуль Юнга (модуль продольной упругости) – физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации. Показывает степень жесткости материала. В Международной системе единиц (СИ) измеряется в Н/м² или паскалях Па. Является одним из модулей упругости.

Коэффициент Пуассона – величина, характеризующая упругие свойства материалов, представляющая собой отношение абсолютных значений попе-

речной деформации $\varepsilon_{\text{поп}}$ к продольной $\varepsilon_{\text{пр}}$ при одноосном напряженном состоянии: $\mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} \right|$. Для всех сталей и алюминиевых сплавов $\mu = 0,3$.

Связь между упругими свойствами и фрикционными характеристиками материалов не строго однозначна, поскольку зависит от множества других факторов (твердость, прочность, коэффициент трения, характер нагружения, структура и т. д.).

Концентрация напряжений – сосредоточение механических напряжений на малых участках, например, прилегающих к местам, в которых происходит резкое изменение формы поверхности или сечения деталей. Концентраторами напряжений являются отверстия, трещины, шероховатость поверхности трения – наличие микронеровностей вызывает концентрацию напряжений во впадинах гребешков, что приводит к появлению трещин и снижает прочность деталей (особенно деталей, работающих при знакопеременных нагрузках).

Твердость поверхностного слоя. Методы оценки твердости и глубины упрочнения поверхностного слоя

Для большинства видов трения, нелегированных и неупрочненных материалов между твердостью и износостойкостью наблюдается четкая прямопропорциональная зависимость. Повышение содержания легирующих элементов, а также тип, количество и форма включений упрочняющей фазы (карбидов, боридов, нитридов, интерметаллидов) и их силы связи (собственные и с матрицей) способствуют повышению износостойкости в тех пределах, пока они не охрупчивают сплав до того состояния, когда его рабочая поверхность начинает разрушаться не столько в результате изнашивания, сколько вследствие образования трещин и отколов.

Твердость – сопротивление материала местной пластической деформации при проникновении в него более твердого тела (вдавливании или царапании).

Прочность – свойство твердых тел сопротивляться разрушению и пластической деформации под действием внешних сил. Прочность материала оценивается его механическими свойствами при растяжении, сжатии, изгибе и срезе, ударной вязкостью, твердостью и микротвердостью, усталостной прочностью, контактной и термической усталостью.

Методы определения твердости:

Методы, основанные на вдавливании жесткого наконечника в виде шара, конуса, пирамиды, цилиндра, лезвия и т. п. в испытуемое тело, обычно с

плоской поверхностью. По скорости приложения нагрузки методы вдавливания разделяются на статические, в том числе длительные (для изучения ползучести), и динамические. К динамическим относятся и такие методы, в основе которых лежит измерение величины упругого отскока.

Методы, основанные на царапании испытываемого тела: а) набором эталонных образцов различной твердости; б) жестким наконечником в виде шара, конуса, пирамиды, иглы, лезвия и т. п.

Испытание вдавливанием стального шарика (по Бринеллю)

Метод Бринелля – способ определения твердости испытываемой поверхности вдавливанием стального закаленного или твердосплавного шарика диаметром $D = 1; 2; 2,5; 5$ или 10 мм при заданной нагрузке P от 10 Н до 30 кН.

Число твердости по Бринеллю – отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{P}{F} \text{ МН/мм}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)} \text{ или } HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \text{ МН/мм}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)}.$$

Метод применяется для материалов с твердостью до 450 HB (стальной шарик) или до 650 HBW (твердосплавной шарик) – бронз, латуней, незакаленных сталей, чугунов и т. п. Иногда указывают условия испытания, например: 220 HB $2,5/750/20$ (здесь $2,5$ – диаметр шарика, мм, 750 – нагрузка, кг, 20 – время выдержки, с).

Метод Роквелла состоит во вдавливании в поверхность образца алмазного индентора с углом при вершине 120° (для твердых и сверхтвердых материалов, шкалы A, C, D) или стального шарика (для мягких материалов – диаметром $1,588$ мм, шкалы B, F, G ; диаметром $3,175$ мм, шкалы E, H, K). Величина твердости представляет собой разность глубин отпечатков, получаемых на испытываемом предмете от вдавливания алмазного конуса или стального шарика под двумя нагрузками: предварительной и окончательной (рис. 1.18). За единицу твердости принята величина, которая соответствует осевому перемещению наконечника на $0,002$ мм. Предварительная нагрузка равна 98 Н (10 кг), окончательная (предварительная плюс основная), Н (кг):

При вдавливании стального шарика (шкала B)	980 (100)
При вдавливании алмазного конуса:	
(шкала C)	1470 (150)
(шкала A)	588 (60)

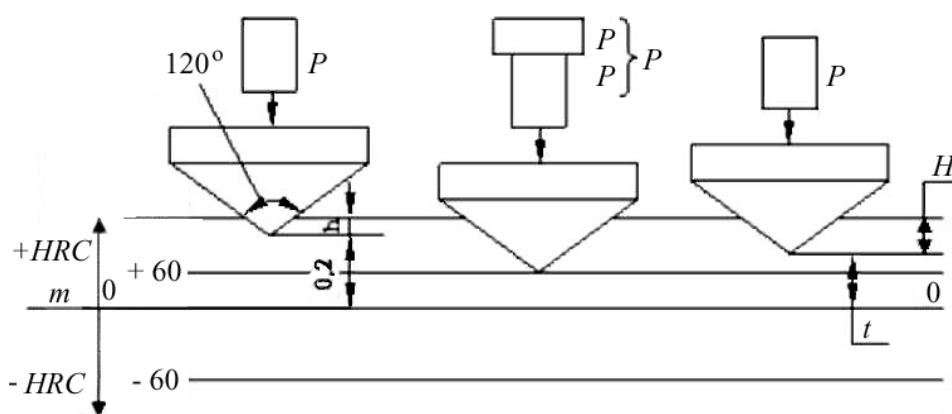


Рис. 1.18. Схема определения твердости по методу Роквелла

Число твердости по Роквеллу – число отвлеченное и выражается в условных единицах.

Для определения твердости тонких слоев или поверхностей нежесткий деталей применяют прибор «Супер-Роквелл», предварительная нагрузка 3 кгс, основная – 15; 30; 45 кгс. Шкала *N* применяется для алмазного конуса, шкала *T* – для шарика (62 HRT15, 70 HRN45). Значения твердости по разным шкалам в ряде случаев несравнимы, поэтому в протоколах всегда указываются условия испытаний.

Испытание вдавливанием алмазной пирамиды (по Виккерсу)

Метод Виккерса – метод определения твердости вдавливанием в поверхность образца четырехгранной алмазной призмы с углом 136° между гранями (рис. 1.19). Число твердости по Виккерсу HV – отношение нагрузки к площади пирамидальной поверхности отпечатка:

$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \text{ МН/м}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)}$$

где *P* – нагрузка на пирамиду, Н (кг); *d* – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм; α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° .

Нагрузка выбирается в зависимости от твердости и толщины испытываемого изделия (от 1 до 100 кгс). Метод используют для материалов с твердостью больше 350 HV. Число твердости мало зависит от нагрузки, возможно исследование тонких упрочненных слоев, листовых материалов. Обозначается HV без

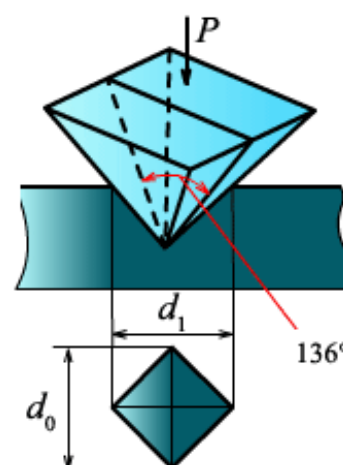


Рис. 1.19. Схема определения твердости по методу Виккерса

указания размерности ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) при нагрузке 30 кгс и выдержке 10...15 с, в других случаях указываются условия испытания, например 400 HV 50/20. Здесь 50 – нагрузка, кгс, 20 – время выдержки, с.

Испытание на микротвердость

Микротвердость – твердость отдельных структурных составляющих сплава или микрообъемов металла. Для исследования используются м и к р о - т в е р д о м е р ы (ПМТ-3, ПМТ-4) – принцип действия которых основан на вдавливании алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой (2, 5, 10, 20, 50, 100 и 200 г, иногда 500 г) и измерении длины диагонали полученного отпечатка.

ГОСТ 9450-76 определяет правила измерения микротвердости изделий и образцов из металлов, сплавов, минералов, стекол, пластмасс, полупроводников, керамики, тонких листов, фольги, пленок, гальванических, диффузионных, химически осажденных и электроосажденных покрытий вдавливанием алмазных наконечников.

Стандарт устанавливает два метода испытаний:

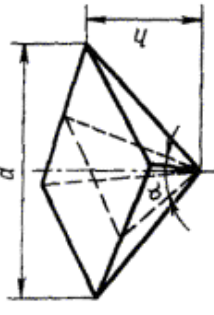
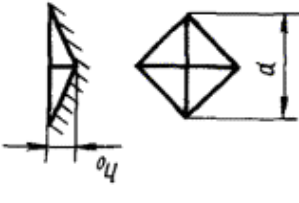
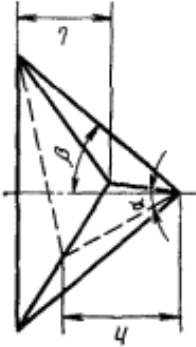
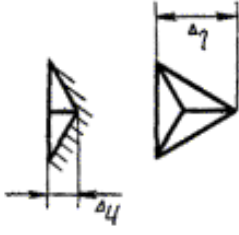
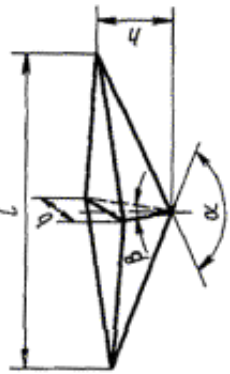
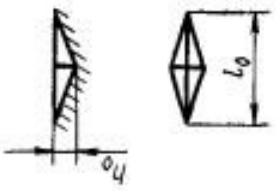
- по восстановленному отпечатку (основной метод);
- по невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

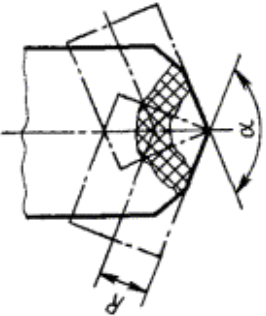
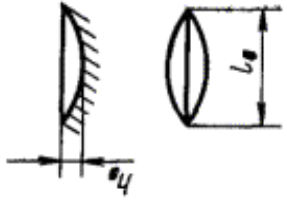
Метод восстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытываемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику определенной формы в течение заданного времени.

После удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка число микротвердости следует определить по формулам или по таблицам, приведенным в стандарте.

Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка (см. табл. 1.5).

Таблица 1.5. Методика расчета значений микротвердости при использовании различных наконечников

Наименование алмазных наконечников	Параметры заострения алмазных наконечников	Форма отпечатков	Формула расчета
1. Четырехгранная пирамида с квадратным основанием	 $\alpha = 136^\circ$		$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \sin d/2}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (\text{если } F \text{ в Н});$ $HV = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin d/2}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (\text{если } F \text{ в кгс}).$
2. Трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника	 $\alpha = 65^\circ; \beta = 77^\circ; \alpha + \beta = 142^\circ$		$H_V = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 3F \sin \alpha}{\sqrt{3}l_V^2} = 0,160 \frac{F}{l_V^2} \quad (\text{если } F \text{ в Н});$ $H_V = \frac{F}{S} = \frac{3F \sin \alpha}{\sqrt{3}l_V^2} = 1,570 \frac{F}{l_V^2} \quad (\text{если } F \text{ в кгс}).$
3. Четырехгранная пирамида с ромбическим основанием	 $\alpha = 172^\circ 30'; \beta = 130^\circ$		$H_\diamond = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 \cdot \cos \beta / 2}{l_\diamond^2 \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \beta / 2}{\operatorname{tg}^2 \alpha / 2}}} = 1,313 \frac{F}{l_\diamond^2} \quad (\text{если } F \text{ в Н});$ $H_\diamond = \frac{F}{S} = \frac{2F \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 \cdot \cos \beta / 2}{l_\diamond^2 \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \beta / 2}{\operatorname{tg}^2 \alpha / 2}}} = 12,873 \frac{F}{l_\diamond^2} \quad (\text{если } F \text{ в кгс}).$

Наименование алмазных наконечников	Параметры заострения алмазных наконечников	Форма отпечатков	Формула расчета
4. Бицилиндрический наконечник	 $\alpha = 136^\circ$; $R = 2 \text{ мм}$		$H_\Phi = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot F \cdot 3R \sin \alpha}{l_\Phi^3} = 0,425 \frac{F}{l_\Phi^3} \text{ (если } F \text{ в Н)};$ $H_\Phi = \frac{F}{S} = \frac{F \cdot 3R \sin \alpha}{l_\Phi^3} = 4,168 \frac{F}{l_\Phi^3} \text{ (если } F \text{ в кгс)}.$

В формулах приняты следующие обозначения:

F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н (кгс);

S – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм²;

l – размер отпечатка, мм;

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм;

R – радиус цилиндра, равный 2 мм;

α и β – углы разных заострений алмазных наконечников, град.

Определение микротвердости вдавливанием по методу невосстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытываемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени, с одновременным измерением глубины отпечатка. Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка, соответствующую его измеренной глубине. Данные исследования проводятся, когда требуются дополнительные характеристики материала (упругое восстановление, релаксация, ползучесть при нормальной температуре).

Поверхность испытываемого изделия (образца) должна быть свободной от загрязнения на участке нанесения отпечатка. Шероховатость испытываемой поверхности изделия (образца) не должна быть грубее $Ra = 0,32$ мкм. Рабочая поверхность алмазного наконечника и поверхность испытываемого изделия должны быть сухими (без смазки). Поверхность образцов для определения микротвердости подготавливается шлифованием, полировкой, травлением, также рекомендуется электролитическая полировка с целью избежания наклепа в тонком поверхностном слое (см. *Шлиф*).

Склерометрия – исследование микротвердости царапанием. Позволяет характеризовать анизотропию материалов, оценивать сопротивление отрыву и срезу, типичное для процессов абразивного изнашивания. При царапании четырехгранной пирамидой микротвердость вычисляется по зависимости

$$H_{ц} = 3,708P/b^2,$$

где P – нагрузка на пирамиду, кгс, b – ширина царапины, мм.

Методика косых шлифов – методика проведения металлографических исследований, позволяющая «расширить» зону измерений. Исследуемую поверхность срезают под некоторым углом α и производят ее подготовку по известным методикам для металлографических исследований (шлифование, полировка, травление и т. д.), рис. 1.20. При угле наклона $\alpha = 5^\circ 44'$ происходит 10-ти кратное расширение зоны измерений (по сравнению с толщиной исследуемого слоя), что вполне достаточно для изучения слоев толщиной 0,2...0,5 мм.

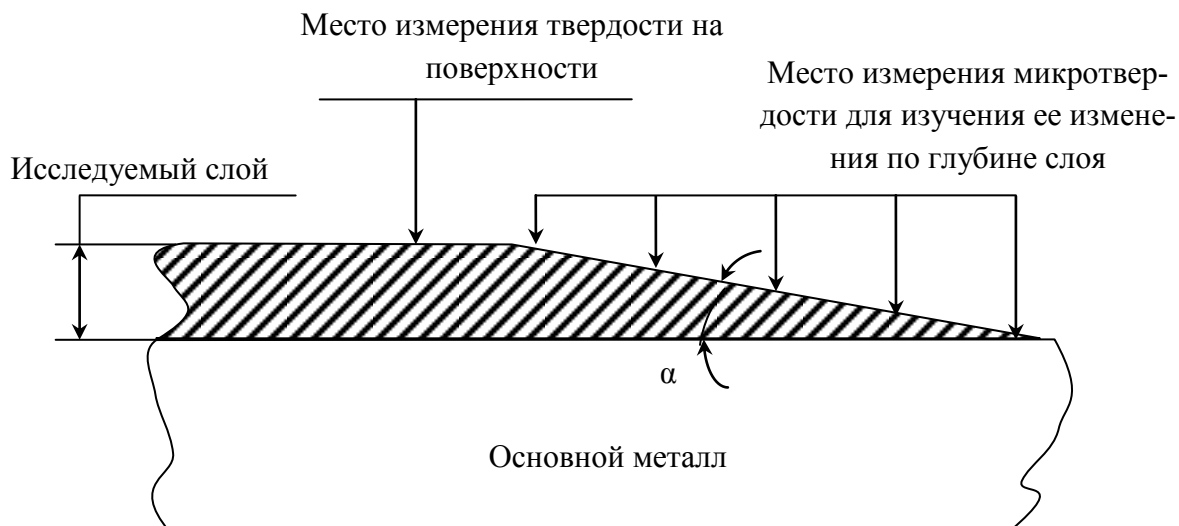


Рис. 1.20. Схема измерения твердости с использованием методики косого шлифа

Минералогическая шкала Мооса – предназначена для грубой сравнительной оценки твердости материалов, представляет собой набор стандартных минералов для определения твердости царапанием испытуемого материала. Эталоны: 1 – тальк; 2 – гипс; 3 – кальцит; 4 – флюорит; 5 – апатит; 6 – ортоклаз; 7 – кварц; 8 – топаз; 9 – корунд; 10 – алмаз (рис. 1.21).

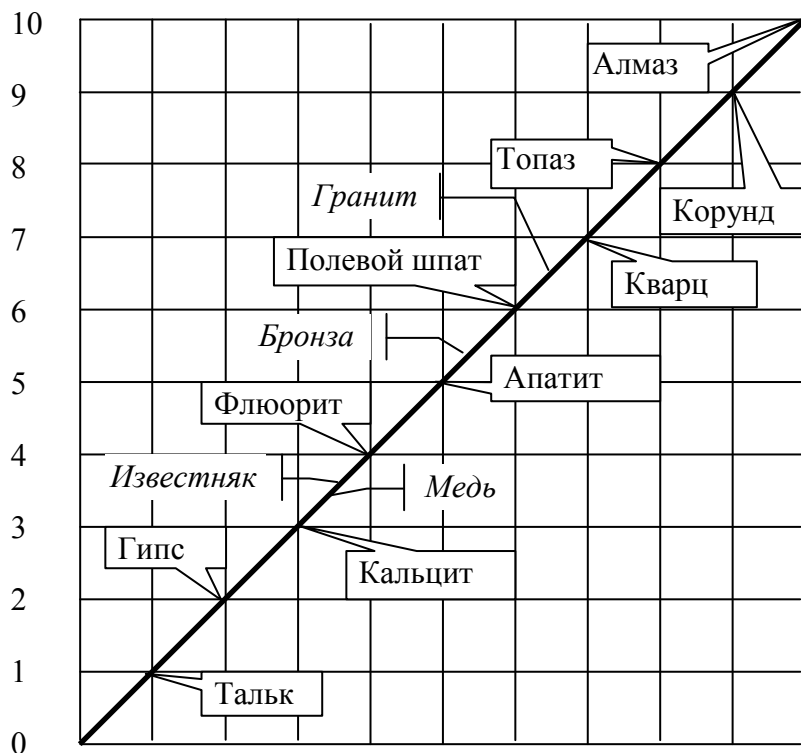


Рис. 1.21. Шкала Мооса

Акустические методы – основаны на измерении относительных изменений свойств колебательной системы преобразователя в зависимости от изменений механических свойств поверхности образца. Преобразователь специаль-

ным наконечником прижимают к исследуемой поверхности с небольшой нагрузкой (4...6 Н), он внедряется в исследуемый слой на несколько микронов. Твердость определяется по изменению собственной частоты колебаний преобразователя. Частоту колебаний измеряют частотомером, шкала прибора градуирована в единицах Роквелла.

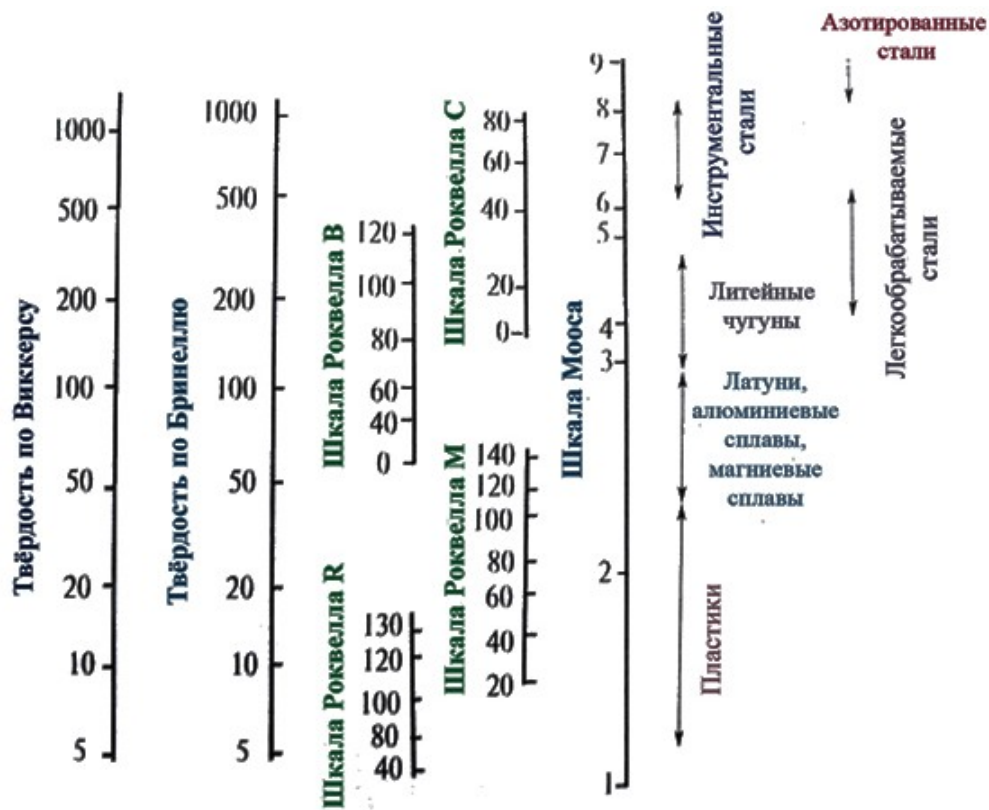


Рис. 1.22. Примерное соотношение шкал твердости, измеряемой различными методами

Характеристики напряженного состояния поверхностных слоев узлов трения. Виды поверхностных напряжений

Остаточные напряжения – напряжения, существующие в теле при отсутствии внешних силовых воздействий на него. Наличие обусловлено неравномерностью температуры по объему тела, образованием во время нагрева или охлаждения новых структур с иной плотностью, наличием включений и т. д.

В зависимости от объема, который охватывается этой системой, различают:

Напряжения 1-го рода (макроскопические) уравниваются в крупных объемах, соизмеримых с размерами детали, их ориентация связана с формой детали.

Напряжения 2-го рода (микронапряжения) уравниваются в пределах одного или нескольких кристаллических зерен (распространяются на отдельные зерна металла или группу зерен).

Напряжения 3-го рода (субмикроскопические) – искажения кристаллической структуры, их ориентация связана со структурой атомной решетки.

Напряжения 2-го и 3-го рода не имеют ориентировки относительно осей деталей.

Остаточные напряжения оказывают механическое воздействие на металл, такое же, как и напряжения, вызванные рабочей нагрузкой.

Остаточные напряжения оказывают влияние на сопротивление упругой и пластической деформации, усталость материалов, износостойкость и сопротивление коррозии.

Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке объясняется следующими причинами.

В процессе механической обработки под действием сил резания в металле возникают нормальные и касательные напряжения, приводящие к упругой и пластической деформации металла. Пластическая деформация вызывает уменьшение плотности металла, и, следовательно, увеличение удельного объема (на 0,3...0,8 % от первоначального). Увеличение объема распространяется на глубину проникновения пластической деформации. Недеформированные нижележащие слои препятствуют увеличению объема наружного слоя, и в нем возникают сжимающие, а в нижележащих слоях – растягивающие остаточные напряжения.

Кроме того, режущий инструмент вытягивает кристаллические зерна наружного слоя металла под режущим клином в направлении резания. После прекращения резания и удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние слои, связанные как единое целое с нижележащими слоями, приобретают остаточные напряжения сжатия, ориентированные по направлению резания. Соответственно этому в нижележащих слоях развиваются уравновешивающие их остаточные напряжения растяжения. В направлении подачи протекают аналогичные процессы, вызывающие возникновение осевых остаточных напряжений.

В процессе резания происходит выделение тепла (вследствие работы деформации и трения), что приводит к большим температурным градиентам и температурным напряжениям, которые могут превосходить предел текучести материала. После установления нормальной температуры в поверхностных слоях детали происходит деформация сжатия, чему препятствуют нижележащие слои. В результате в поверхностных слоях появляются растягивающие ос-

таточные напряжения, а в нижележащих – напряжения сжатия, уравновешивающие растягивающие напряжения.

Итак, при обработке металла в его наружном слое под влиянием пластической деформации при отсутствии ползучести развиваются остаточные напряжения сжатия, тепловой же эффект от резания приводит к появлению растягивающих напряжений.

Так как оба эффекта действуют совместно, но в противоположные стороны, то знак остаточного напряжения в наружном слое зависит от того, какой из факторов превалирует.

Это объясняет существенную зависимость величины и знака остаточных напряжений от технологического режима обработки.

По своему характеру остаточные температурные напряжения, так же как и напряжения, обусловленные пластической деформацией, являются остаточными напряжениями 1-го рода.

Технологические факторы (методы и режимы обработки, состояние инструмента, СОЖ и др., а также условия выполнения заготовительных операций и термообработки) оказывают большое влияние на величину и знак остаточных напряжений.

Например, точение обычно вызывает появление растягивающих напряжений, которые могут достигать величины до 700 Н/мм^2 ; глубина распространения их находится в пределах $50 \dots 200 \text{ мкм}$, в зависимости от условий обработки.

Повышение *скорости резания* при точении малопластичных материалов способствует появлению дополнительных растягивающих напряжений, а при обработке пластичных материалов, воспринимающих закалку, увеличение количества теплоты в зоне резания, связанное с повышением скорости резания, может привести к закалке поверхностного слоя и превращению растягивающих напряжений в напряжения сжатия.

При точении закаленных материалов увеличении скорости резания может вызвать отпуск, вследствие чего уменьшается удельный объем металла, что приводит к снижению остаточных напряжений сжатия.

Увеличение *подачи* при обработке пластичных сталей приводит к росту пластической деформации поверхностного слоя и соответствующему росту остаточных напряжений растяжения, при точении малопластичных материалов – увеличение остаточных напряжений сжатия, а при обработке малопластичных закаленных сталей – их снижение.

Износ резца приводит к увеличению пластической деформации поверхностного слоя металла и глубины ее проникновения. Поэтому при точении пластичных материалов происходит увеличение остаточных напряжений растяжения, а при точении малопластичных материалов – увеличение сжимающих напряжений.

Технологические остаточные напряжения в тонком поверхностном слое не оказывают заметного влияния на изнашивание трущихся пар, т.к. в течение короткого времени работы они релаксируют и в поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия. Однако, если большие остаточные напряжения распространяются на значительную глубину (более 0,5 мм), то остаточные напряжения растяжения несколько увеличивают износ, а напряжения сжатия его уменьшают. Но по сравнению с шероховатостью остаточные напряжения оказывают на износ более слабое влияние [17].

Теоретическое прогнозирование остаточных напряжений очень сложно из-за большого количества влияющих факторов, поэтому экспериментальное их определение играет очень важную роль.

Механические методы измерения остаточных напряжений основаны на предположении, что разрезка или удаление части детали с остаточными напряжениями эквивалентны приложению к оставшейся детали, на вновь появившихся поверхностях, напряжений, обратных остаточным. Эти обратные напряжения вызывают деформацию детали или усилия в устройствах, препятствующих деформации. Измеряя возникающие деформации (деформационными методами) или силы реакции (силовыми методами), можно вычислить остаточные напряжения (рис. 1.23).

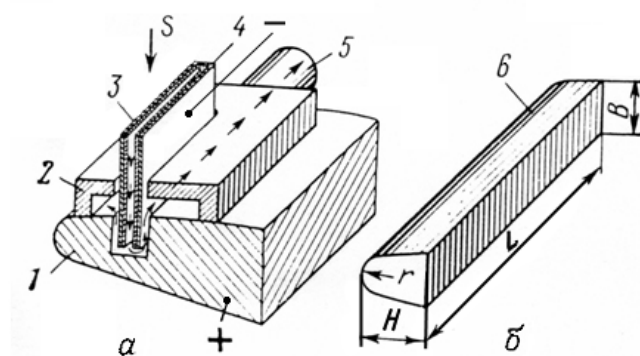


Рис. 1.23. Схема (а) электрохимической вырезки образца (б) для определения остаточных напряжений в кромке лопатки: 1 – отрезаемый образец; 2 – местная электролизная ванночка; 3 – катод из латуни ЛС 59-1; 4 – изоляция нерабочих участков катода; 5 – отвод электролита; 6 – вырезанный образец; S – направление подачи электрода

Рентгеноанализ остаточных напряжений (макронапряжений) основан на измерении деформации кристаллической решетки по смещению дифракционных линий. Остаточные напряжения приводят к однород-

ному изменению межплоскостного расстояния, и средняя деформация кристаллической решетки будет равна деформации материала, обусловленной остаточными напряжениями. Проводя соответствующие измерения можно вычислить величину остаточных напряжений.

Магнитоупругий метод определения остаточных напряжений основан на зависимости магнитной проницаемости объема металла от значения действующего в данном объеме остаточного напряжения. Этот метод можно использовать лишь для металлов, обладающих магнитными свойствами.

3.4. Обеспечение оптимальной контурной площади и шероховатости пар трения. Приработка

Приработка – процесс изменения микрогеометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся, при постоянных внешних условиях, в уменьшении работы трения, температуры и интенсивности изнашивания. В результате приработки образуются оптимальные пятна контакта, устанавливается равновесная шероховатость, изменяются исходная структура и физико-механические характеристики поверхностных слоев. Основные факторы, влияющие на процесс приработки – нагрузка, скорость, свойства материала и смазочной среды, исходная контурная площадь и шероховатость.

Равновесная шероховатость – эксплуатационная шероховатость, которая воспроизводится при стационарных условиях трения и поддерживается практически неизменной на всем протяжении эксплуатации пары при постоянстве режимов работы. Она не зависит от технологической шероховатости, только от условий изнашивания (материала пар, давления, температуры на поверхности трения, условий смазки, наличия загрязнений в смазке и т. д.). Может быть как больше, так и меньше исходной.

Притирка (доводка) – процесс финишной обработки, при котором съем металла с обрабатываемой поверхности осуществляется в основном абразивными зернами, временно закрепленными или находящимися в свободном состоянии в зоне резания. Инструментом при доводке является притир, на поверхность которого наносят пасту или суспензию, представляющую собой смесь абразивного порошка малой зернистости с различными компонентами, выполняющими одновременно роль связки и СОЖ.

Притирку осуществляют по нескольким схемам:

Притирка с нанесением абразивной пасты на притир – используется смесь с повышенной концентрацией режущих зерен. Производительность процесса невысокая, но повышается точность геометрической формы и качество поверхности ($Ra = 0,1 \dots 0,01$ мкм).

Притирка шаржированным притиром – метод менее производителен, но обеспечивает высокую точность и малую шероховатость поверхности.

Притирка монолитным алмазным притиром – осуществляют дисками с нанесенной алмазной пастой. Способ наиболее высокопроизводителен, однако он не позволяет полностью использовать режущие возможности алмазного слоя.

Безабразивная доводка применяется при обработке мягких или пористых деталей; сухая – для получения зеркальных поверхностей.

Взаимная доводка (притирка) – обработка поверхностей деталей без участия притира, роль которого взаимно выполняют обрабатываемые детали. Этот метод применяется для подгонки деталей с высокой точностью.

Обкатка – особый режим эксплуатации нового механизма либо механизма, прошедшего процедуру капитального ремонта, восстановления или замены отдельных деталей и узлов. Назначение обкатки – приработка в едином комплексе всех пар трения. Организуется правильным выбором скоростного, нагрузочного и температурного режимов, большое значение имеет качество используемых смазочных материалов с учетом большого количества продуктов износа. Приложение эксплуатационных нагрузок к машине, не прошедшей обкатку, неизбежно приводит к отказам перенапряженных пар трения (заеданию, перегреву, заклиниванию и т. д.).

Приработочный слой – технологический слой, наносимый на поверхности трения для облегчения их приработки. Создаются на поверхностях трения различными путями: диффузионным насыщением, химическими методами, методами фрикционного нанесения антифрикционных материалов, наклеиванием приработочной пленки, введением в масло присадок, способствующих образованию вторичных структур с приработочными свойствами.

ЧАСТЬ 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА

ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ И ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

1.1. Физическое и математическое моделирование трибологических явлений

Моделирование – исследование процессов, явлений или объектов на их моделях (например, математических, физических) или в реальных условиях с применением методов теории подобия (см. *Подобия теория*) при постановке и обработке результатов эксперимента; использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов. На идее моделирования как одной из основных категорий теории познания базируется любой метод научного исследования – как теоретический (знаковые, абстрактные модели), так и экспериментальный (предметные модели).

На рис. 2.1. представлена схема изменения геометрических, кинематических и силовых факторов в косозубом зацеплении и при контактировании конических роликовых моделей.

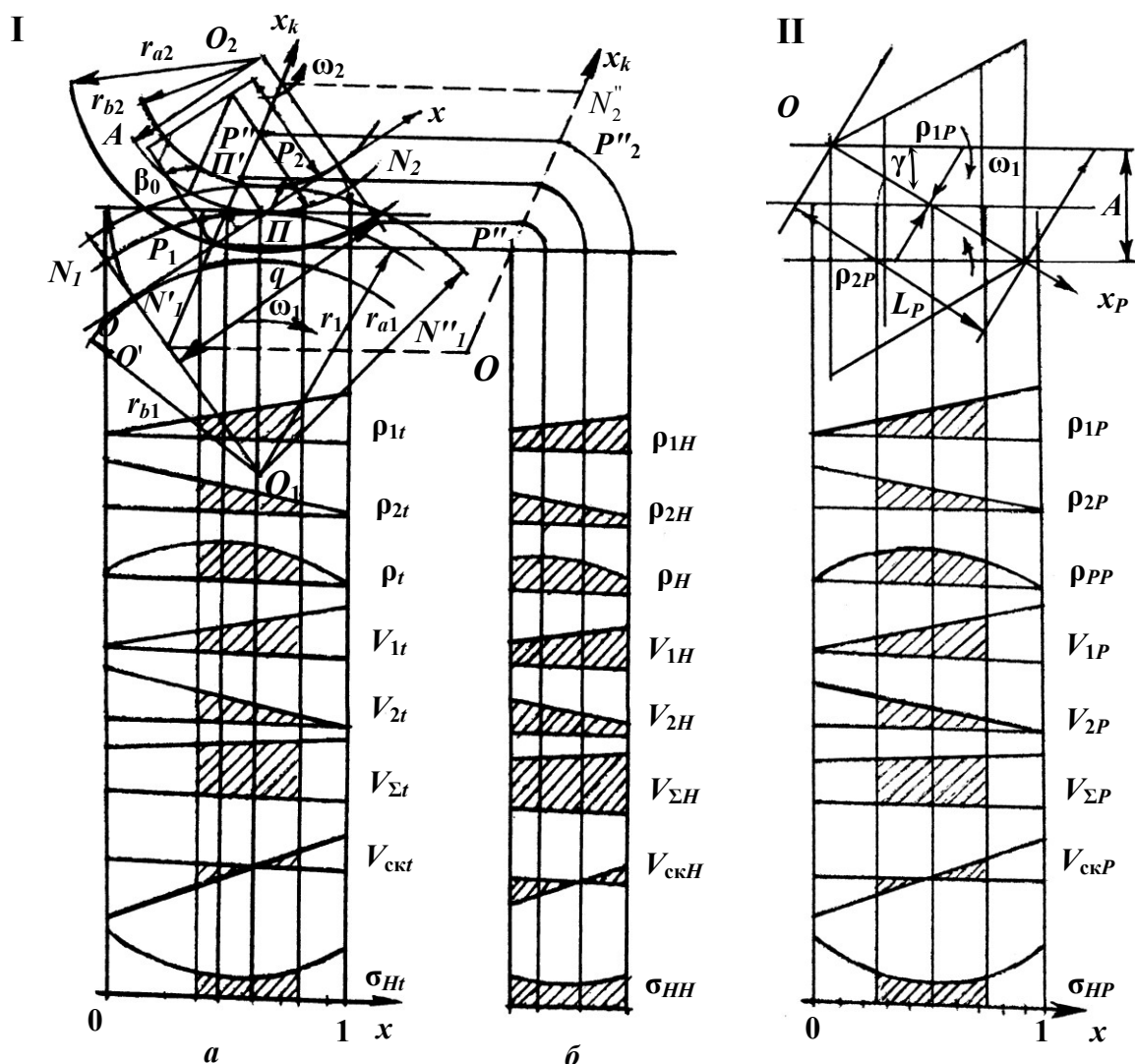


Рис. 2.1. Схема подобия геометрических, кинематических и силовых факторов: I – в косозубом зацеплении (*a* – изменение вдоль линии зацепления; *б* – изменение вдоль контактной линии); II – вдоль линии контакта конических роликовых моделей.

r_{b1}, r_{b2} – радиусы основных окружностей колес; r_1, r_2 – радиусы начальных окружностей колес; r_{a1}, r_{a2} – радиусы окружностей выступов; q – теоретически возможная длина линии зацепления; P_1P_2 – активный участок линии зацепления; P_1O – контактная линия; ω_1, ω_2 – частота вращения колес; γ – угол наклона образующей конуса; L_P – длина образующей; A – межосевое расстояние.

Подобие – взаимно однозначное соответствие между двумя объектами, при котором функции перехода от параметров одного из объектов к параметрам другого объекта известны, математические описания обоих объектов преобразовываются в тождественные. При проведении модельных триботехнических испытаний необходимо выдерживать подобие в тех случаях, когда результаты испытаний какого-либо узла *трения* распространяются на всю группу аналогичных узлов. Подобие конкретных явлений при трении выражается уравнениями, в которых искомая безразмерная переменная определяется как однозначная функция независимых переменных и комплексов (*критериев по-*

добия). Например, для коэффициента трения уравнение имеет вид: $f = f(x_i/x_{i0}, K_1, K_2, \dots, K_i)$, где x_i/x_{i0} – независимые переменные, K – комплексы. Для всех подобных явлений комплексы должны иметь одинаковое значение.

Подобия теория – теория, согласно которой два явления подобны только в том случае, если они качественно одинаковы и характеризуются равными значениями определяющих критериев подобия. Два явления называют подобными, если все количественные характеристики одного из них получаются из соответствующих количественных характеристик другого путем умножения их на константы подобия, одинаковые для всех однородных величин. Подобия теория используется для постановки экспериментов и обработки их результатов, лежит в основе моделирования, широко применяется в различных областях техники. Физическое моделирование базируется на трех теоремах анализа подобия. *Первая теорема подобия*: у подобных явлений определенные сочетания параметров, критерии подобия численно равны. Примером таких сочетаний параметров являются обобщенные переменные. *Вторая теорема подобия*: первичную информацию, заданную в виде соотношения между m размерными параметрами, определяющими физический процесс, можно преобразовать во вторичную информацию в виде n безразмерных обобщенных переменных, где $n = m - k$ (k – число основных единиц, размерность которых независима). *Третья теорема подобия*: необходимым и достаточным условием подобия систем является пропорциональность всех сходственных характеристик, входящих в условие однозначности. Условия однозначности, или граничные краевые условия изучаемых явлений, включают следующие: геометрические, характеризующие форму и размеры элементов пары трения (напр., комплекс геометрических размеров); физические, характеризующие физические свойства среды и контактирующих тел (например, теплофизические и механические характеристики); граничные, характеризующие особенности протекания процесса на границах тел, что связано с теплообразованием и окислением в зоне контакта; временные, характеризующие особенности протекания процесса во времени [3, 4, 36, 38].

Моделирование трибологических процессов – исследование процессов трения и изнашивания на моделях, находящихся в отношении подобия к моделируемому объекту.

Физическое моделирование – исследование физически подобных процессов на установках, сохраняющих физическую природу явлений, но воспроизводящих их в других геометрических размерах или ином физическом

смысле. Особенность модели – одинаковая природа с натурным объектом (те же пары трения и смазочный материал). Возможна реализация на малогабаритных моделях в измененном (чаще всего ускоренном) масштабе времени и оценка точности моделирования, рис. 2.1.

Закон моделирования определяется в виде масштабного фактора, который является совокупностью всех масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре для параметров режима работы, материалов трибосопряжения и конструкции, включенных в критерии подобия. Связи между параметрами модели и натуре устанавливаются расчетным путем после анализа моделируемой трибосистемы. Для установления связи между входными и выходными параметрами трибосистемы применяют методы размерностей, подобия, энергетический, энергоинформационный и их комбинации.

Математическое моделирование основано на математическом подобии и на изоморфизме уравнений, т. е. способности их описывать различные по природе явления и выявлять различные функциональные связи. При создании модели реальное явление неизбежно упрощается, схематизируется, а схема описывается с помощью того или иного математического аппарата.

При математическом моделировании используются аналитические и статистические модели. Выбор

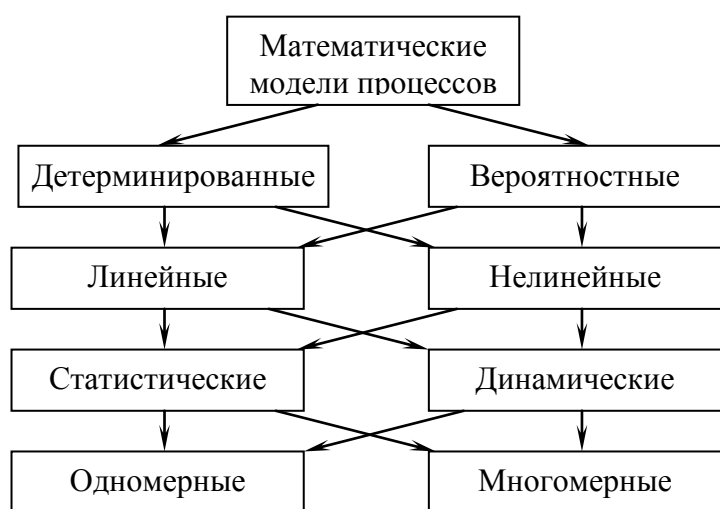


Рис. 2.2. Классификация математических моделей

мат. модели осуществляется путем анализа процесса изменения состояния изделия, охватывающего его внутреннюю логику, специфику, взаимодействие с другими процессами и окружающими условиями. На рис. 2.2 приведена классификация математических моделей, применяемых для описания реаль-

ных процессов. В практических исследованиях при прогнозировании состояния изделий в качестве моделей тренда в основном используют функции: линейную $y = at + b$, квадратичную $y = at^2 + bt + c$, степенную $y = t^n$, показательную $y = a^t$, экспоненциальную $y = ae^t$, логистическую $y = a/[1 + b \exp(-ct)]$. Выбор модели осуществляют по ряду статистических критериев (например, по дисперсии, корреляционному отношению и др.). От

правильности выбора аппроксимирующей функции зависит, насколько модель адекватна реальной связи между параметрами и будет ли она отражать эту связь с заданной степенью точности.

И м и т а ц и о н н о е моделирование позволяет получать экспериментально-теоретические решения – сочетание математической модели и экспериментального получения эмпирических зависимостей там, где задача не имеет корректного математического описания. Применяется к процессам, в ход которых может вмешиваться человек, который, в зависимости от складывающейся обстановки принимает те или иные решения. Затем по математической модели определяется ожидаемое изменение системы в ответ на изменения процесса и, при необходимости, осуществляется корректировка изменений. В результате многократного повторения «изменение – коррекция» принимается наиболее правильное решение по управлению изучаемым процессом.

А н а л о г о в о е моделирование базируется на одинаковом для модели и натуры математическом описании и используется для имитации на основе аналогий физической системы по ее элементам, при этом каждому из физических элементов натуры в модели соответствует определенный эквивалент, например, теплопроводность моделируется электропроводностью, теплоемкость – электроемкостью и т. д. Значения максимумов и минимумов назначают на основании анализа условий подобия. В качестве моделей служат электрические цепи, составленные из пассивных элементов, источников тока и напряжения и электронных операционных усилителей.

Эксперимент – метод познания, при помощи которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются явления действительности.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью, установление последовательности их проведения и разработка математической модели для описания эксперимента [26, 34].

Эксперимент неполный – эксперимент, в который входит определенное число комбинаций изучаемых факторов, выбираемых на основании необходимых условий постановки эксперимента.

Эксперимент полный факторный – эксперимент, в который входят все возможные комбинации изучаемых факторов при выбранном числе уровней. Число опытов равно n^k , где n – число уровней, а k – число факторов. Полный факторный эксперимент является основой всех планов при постановке активных экспериментов [26, 34].

Эксперимент активный – эксперимент, осуществляемый по оптимальному плану, составленному с помощью методов математической статистики (теория эксперимента, комбинаторика и др.). На этапе анализа результатов эксперимента рассматриваются критерии воспроизводимости, адекватности и др.; при продолжении эксперимента – оптимальные стратегии.

Эксперимент пассивный – эксперимент, проведение и постановка которого сводится к реализации однофакторных экспериментов, и методы математической статистики используются только для обработки результатов.

Необходимое число опытов определяется числом возможных комбинаций уровней варьирования факторов (независимых переменных) и количеством повторных опытов. Планирование экспериментов может осуществляться по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ), которая предусматривает одновременное варьирование всех исследуемых факторов на двух уровнях – верхнем и нижнем, то есть максимальном и минимальном значении рассматриваемого фактора. В этом случае необходимое число опытов определяется по формуле $N = 2^k$, где k – число рассматриваемых факторов. Для уменьшения количества опытов иногда используется *дробный факторный эксперимент* (ДФЭ), в котором исключается изучение взаимодействий параметров. План ДФЭ записываются как $N^{(k-p)}$, где N – количество уровней, k – число исследуемых параметров, а p – число параметров, замещающих взаимодействия. Разница $k-p$ называется разрешением.

Для описания объекта исследования иногда используют схему «черного ящика». Стрелки справа, обозначенные y – выход «черного ящика», являющие собой численные характеристики целей исследования. Их называют *параметрами оптимизации* или же целевой функцией, рис. 2.3.

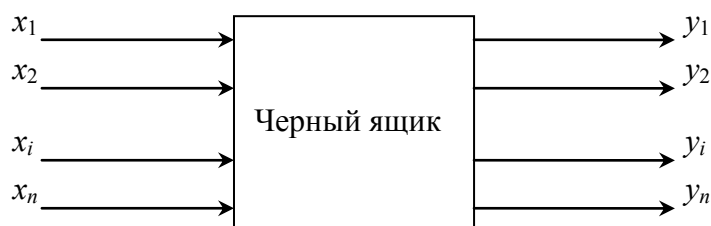


Рис. 2.3. Представление об объекте исследования в виде «черного ящика»

Параметр оптимизации – результат эксперимента, оптимизированный путем варьирования факторов по определенным образом выбранным критериям (например, критериям согласия).

Все способы воздействия на поведение «черного ящика» обозначены x – это *факторы* или входы «черного ящика».

Под математической моделью понимают уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Это уравнение в общем виде можно записать так:

$$y = \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k).$$

Такая функция называется функцией отклика.

План эксперимента задается таблицей, называемой *матрицей планирования эксперимента*. Она включает в себя последовательность проведения опытов, значения факторов и эффектов их взаимодействий, а также значения исследуемой функции (параметра оптимизации).

Матрица планирования эксперимента имеет вид таблицы, в которой столбцы – факторы, строки – различные их значения. Например, матрица полного факторного эксперимента для 2 уровней и 3 факторов представлена на рис. 2.4, где x_1, x_2, x_3 – факторы эксперимента, «+» значит, что в данном опыте учитывается этот фактор эксперимента, «–» – в данном опыте отсутствует этот фактор эксперимента. Каждая строка матрицы – это условие опыта.

Чтобы исключить систематические ошибки опыты проводят в случайной последовательности. Порядок проведения опытов выбирается по таблице случайных чисел. Для компенсации случайных погрешностей каждый опыт повторяют n раз.

Номер опыта	x_1	x_2	x_3
1	+	+	+
2	–	+	+
3	+	–	+
4	–	–	+
5	+	+	–
6	–	+	–
7	+	–	–
8	–	–	–

Рис. 2.4. Матрица полного факторного эксперимента

Планы могут быть двух видов:

- последовательный, при котором сначала берется верхнее или нижнее предельное значение независимой случайной величины, затем оно меняется через определенные интервалы до достижения второго порогового значения;
- случайный, при котором выбранные значения варьируются случайным образом (рандомизированы), принимая то меньшее, то большее значения. Рандомизированный план позволяет исключать влияние внешних условий на эксперимент (например, атмосферное давление, температуру, влажность воздуха и т. п.). Для рандомизации экспериментов приемлем «игровой» метод. Например, выбранные комбинации условий пронумеровать и провести жеребьевку или бросать игральные кости. Вполне логично применять таблицы случайных чисел.

Обработка результатов экспериментов заключается в статистическом анализе и включает следующие этапы: 1. Проверка воспроизводимости результатов. 2. Определение вида анализируемой функции или математической модели объекта исследования. 3. Проверка адекватности модели, т. е. ее способности описывать реальный объект исследования.

Метод подобия – метод математического моделирования, основанный на переходе от обычных физических величин, влияющих на моделируемую систему, к обобщенным величинам комплексного типа, составленным из исходных физических величин, но в определенных сочетаниях, зависящих от конкретной природы исследуемого процесса. Теория подобия изучает методы построения и применения этих переменных и применяется в тех случаях математического моделирования, когда аналитическое решение математических задач моделирования невозможно из-за сложности и требований к точности. Теория подобия применяется в этих случаях для синтеза соотношений, получаемых на основе физического механизма изучаемого процесса и данных численного решения или эксперимента [26, 34].

Метод размерностей – метод определения числа и структуры безразмерных степенных комплексов путем сопоставления размерности величин, существенных для моделируемого объекта. Применяется в задачах трибологии для получения обобщенных переменных и при анализе их влияния на коэффициент трения, интенсивность изнашивания и др., а также при расчете масштабного фактора. Применение метода размерностей без последующей проверки полученных результатов может привести к серьезным ошибкам [26, 34].

Критерий подобия – безразмерный комплекс физических величин, определяющий тот или иной физический процесс; у подобных процессов определенные сочетания параметров, критерии подобия численно равны. Некоторые критерии при моделировании вырождаются в с и м п л е к с ы – отношения одноименных физических величин. Критерии можно умножать, делить друг на друга, на постоянную величину, возводить в степень, получая новые критерии. См. также *Подобия теория* [26, 34].

Критерий согласия (з н а ч и м о с т и) – характеристика степени расхождения теоретического и статистического распределений какого-либо исследуемого признака. Используются на всех стадиях активных экспериментов и при интерпретации результатов пассивных экспериментов. Наибольшее распространение получили: а) критерий Пирсона $\hat{\chi}^2$, характеризующий отличие частоты появления какого-либо события от ожидаемого значения:

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{m=1}^k \frac{(h_m - np_m)^2}{np_m}, \text{ где } h_m - \text{наблюдаемое количество результатов измерений,}$$

np_m – ожидаемое число этих результатов, k – число интервалов; б) критерий Стьюдента $\hat{t}$, используемый при проверке гипотезы о среднем значении совокупности

$$\hat{t} = \frac{\bar{x} - M_x}{\sigma} \sqrt{n}, \text{ где } \bar{x} - \text{среднее арифметическое, } M_x - \text{математическое}$$

ожидание независимой переменной, σ – среднее квадратическое отклонение, n – объем выборки; в) критерий Фишера, используемый при проверке гипотезы о дисперсиях: $\hat{F} = D_1^2 / D_2^2$, где D_1^2 и D_2^2 – дисперсии двух выборок.

Обобщенные переменные – безразмерный комплекс физических величин, определяющий тот или иной физический процесс. К примеру, критерий Фурье $Fo \equiv at / S^2$, где a – коэффициент температуропроводности, t – время, S – характерный размер, для нестационарных процессов выражает соответствие между средней скоростью изменения условий в окружающей среде (в частности, произвольно задаваемой температуры на поверхности тела) и средней скоростью перестройки температурного поля внутри тела. Для описания течения смазочного материала в трибоконтакте используется критериальное выражение $Eu Re^m = La = \text{const}$, где Eu – число Эйлера, Re – число Рейнольдса, La – критерий Лагранжа; показатель степени m и значение const для каждого узла трения находятся экспериментально.

Метод обобщенных переменных – один из методов теории подобия, состоящий в замене отдельных параметров безразмерными комплексами, объединяющими несколько параметров. Безразмерный комплекс может быть получен методом размерностей, методом подобия или из общих физических соображений (например, комплекс параметров шероховатости поверхности). Обобщенные переменные (ОП) используются для решения трех классов задач: уменьшение объема исходной информации путем объединения параметров в ОП; расчет масштабного фактора; факторное планирование эксперимента, когда в качестве факторов используются ОП. Применяя ОП, удастся сократить количество переменных, объем экспериментов и представлять информацию в сжатой форме в виде уравнений [26, 34].

Критерии заедания – теоретические и эмпирические критерии, позволяющие прогнозировать начало заедания (нарушение сплошности масляного слоя между контактирующими поверхностями, «мостики» сварки между контактирующими поверхностями; повышение температуры в контакте). К расчетным критериям заедания относятся: 1) Критерий Олмена, согласно которому заедание не наступает, если произведение контактного давления на скорость скольжения не превышает допустимого значения: $p_k \cdot v_{ск} \leq C_0 = \text{const}$. 2) Критерий Олмена–Штрауба (для зубчатых передач), требующий, чтобы произведение контактного давления на скорость скольжения и на расстояние от данной точки до полюса зацепления не превышало допустимого значения: $p_k \cdot v_{ск} \leq (9...22)$. 3) Критерий Кистьяна, оценивающий противозадирную стойкость зубчатых колес по допустимому напряжению заедания: $\sigma_p < [\sigma_3]$, где σ_p – расчетное напряжение в полюсе зацепления, $[\sigma_3]$ – допустимое напряжение заедания, определяемое экспериментально. 4) Критерий Гофера, согласно которому заедание наступает если $S = \frac{mzb}{10\varphi N} \geq 1$, где S – критерий заедания; m – модуль, мм; z – число зубьев шестерни и колеса; b – длина зуба, мм; N – передаваемая мощность; $\varphi = 100 \frac{z}{(7z_1 + 1)z_2}$, где z_1 и z_2 – числа зубьев ведомого и ведущего зубчатых колес. 5) Критерий Менга, согласно которому для установившихся режимов эксплуатации связь между нагрузкой заедания P_n и скоростью скольжения $v_{ск}$ определяется произведением $fP_n v_{ск} = \text{const}$, для неустановившихся режимов эксплуатации, при которых объемные температуры трущихся тел существенно не изменяются, связь между нагрузкой заедания и ско-

ростью скольжения определяется выражением $f p_k v_{\text{ск}} = \text{const}$ или $f \sqrt{P_n} v_{\text{ск}} = \text{const}$. 6) Критерий Соловьева–Шеремета, согласно которому для со-

стояния тяжело нагруженного быстроходного контакта качения с проскальзыванием в период заедания имеет место зависимость $\frac{2b}{h} = A \left(\frac{2b p_n}{\mu_0 v_{\text{ск}}} \right)^B$, где $\frac{2b}{h}$ –

критерий, который характеризует наибольшую несущую способность слоя смазки в условиях качения, когда противозадирная стойкость контакта качения

наибольшая; $\frac{2b p_n}{\mu_0 v_{\text{ск}}}$ – критерий, характеризующий уменьшение несущей спо-

собности смазочного слоя под действием скорости скольжения и с учетом конкретных значений нагрузок, геометрии контакта и свойств смазки, $2b$ – ширина зоны контакта, h – толщина смазочной пленки в зоне контакта при чистом качении, p_n – максимальное давление в зоне контакта, $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения, μ_0 – динамическая вязкость смазки при температуре поверхности трения и атмосферном давлении, A и B – коэффициенты, которые для каждого сочетания материалов и масел могут быть найдены различными методами исходя из экспериментальных данных на заедание [37, 43, 44, 51].

Критерий макро- и микрогеометрии контактирования – одна из обобщенных переменных, полученная из критериев подобия, учитывающих параметры микро- и макрогеометрии. Применяется для анализа влияния микро- и макрогеометрии, режимов работы на выходные характеристики пары трения.

1.2. Классификация узлов трения по трибологическому признаку. Моделирование трибологических процессов в типичных узлах трения

Все пары трения по трибологическому признаку можно разбить на семь групп.

Первая группа – пары трения скольжения с осесимметричными поверхностями контактирования. Сюда относят плоские и кольцевые пяты, диски, фрикционные муфты и др. Характерны одинаковые скорости скольжения на круговой траектории произвольного радиуса. При осесимметричной нагрузке и осесимметричной жесткости деталей распределение износа на каждой из по-

верхностей пары будет также осесимметричным, и осевое сечение детали дает полное представление о форме изношенной поверхности.

Вторая группа – вращательные пары трения типа подшипников скольжения. В случае циркуляционного нагружения вала (вал под нагрузкой вращается) и местного нагружения вкладыша (вкладыш неподвижен и воспринимает местную нагрузку от вала) поверхность вала изнашивается равномерно по окружности, а износ вкладыша будет односторонним. При жидкостном трении зона износа вкладыша смещена от приложенной силы в направлении вращения вала.

Третья группа – вращательные пары с неравномерным износом по окружности обеих трущихся поверхностей. Сюда относят шатунные подшипники скольжения, шарниры с углом относительного возвратно-кругового качания менее 360° . С целью анализа изнашивания по окружности строят векторные диаграммы нагрузок, а по ним – диаграммы износа.

Четвертая группа – направляющие скольжения прямолинейного перемещения столов, суппортов, крейцкопфов и др. Условия работы направляющих существенно различаются, поэтому общую закономерность распределения износа по поверхностям трения найти трудно. В каждом отдельном случае выполняют силовой и временной (по времени контактирования теми или иными участками) анализ, на основе которых прогнозируют форму изношенных поверхностей.

Пятая группа – цилиндры, поршни, поршневые кольца ДВС, компрессоров, гидравлических, машин и т. д. Как правило, наибольший износ, связанный с влиянием повышенных температур, нагарообразования, неблагоприятных условий для смазки, наблюдается в верхней части гильзы цилиндра. Неравномерность изнашивания в радиальном направлении связана с различием действия абразивных частиц по поверхности, несимметричностью температурного поля гильзы. Неравномерность изнашивания гильзы по высоте и воздействие абразивных частиц приводят к неравномерности изнашивания по высоте поршневых колец, верхняя часть которых всегда изношена больше, чем нижняя.

Шестая группа – детали, образующие винтовую пару. Распределение износа в радиальном направлении определяется деформацией под нагрузкой, а по оси – раздачей усилий по виткам гайки.

Седьмая группа – зубчатые передачи. Наиболее распространенный эксплуатационный вид повреждения закрытых передач, работающих при высоких контактных напряжениях – усталостное выкрашивание (питтинг). Прогресси-

рующий питтинг вызывает искажение профиля и приводит к снижению ресурса. Для открытых передач характерно наличие абразивного износа, который проявляется в виде мелких параллельных полос, перпендикулярных оси колеса. В процессе износа уменьшается размер зуба по толщине, увеличиваются зазоры в зацеплении, нарушается эвольвентность рабочего участка профиля зуба. У тяжело нагруженных зубчатых колес вследствие высоких давлений и скоростей скольжения в зоне контакта происходит разрушение смазочной пленки и местный нагрев металла вплоть до его оплавления. Этот комплекс явлений приводит к заеданию, которое заключается в приваривании частиц материала одного зуба к другому (микросварка). Оторвавшиеся наросты на зубьях оставляют следы в виде борозд на рабочих поверхностях сопряженных зубьев. При тяжелых формах заедания возможно наступление функционального отказа.

1.3. Методы и оборудование для оценки трибологических характеристик поверхностей трения и смазочных материалов

1.3.1. Металлографические исследования

Металловедение – прикладная наука, изучающая связь между химическим составом, строением, структурой и свойствами металлов и сплавов, закономерности изменения структуры и свойств под воздействием внешних факторов с целью изыскания оптимального состава и способов обработки сплавов для получения заданных свойств. Одна из основополагающих дисциплин триботехнологии.

Металлофизика, физика металлов – теоретическая основа металловедения, раздел физики, изучающий физико-химические свойства металлов и сплавов, обусловленные их электронным и атомно-кристаллическим строением, а также процессы, происходящие в металлах и сплавах при их получении, механической, термической обработке, а также в условиях эксплуатации. Основные направления и области изучения: процессы при упрочнении металлов и сплавов под действием пластической деформации, фазовых превращений и облучения; изучение закономерностей разрушения; изучение межатомного взаимодействия в сплавах и термодинамических функций металлических фаз; исследование кинетики фазовых превращений и механизма структурных изменений; изучение особенностей электронных состояний металлов в разных условиях; анализ природы микромеханизма пластической деформации и т. д.

Кристаллическая решетка – условный геометрический образ, характеризующий правильное расположение атомов (ионов, молекул) вещества в кристаллическом состоянии. В зависимости от частиц, формирующих кристаллическую решетку, может существовать четырнадцать ее типов, наиболее распространенные из них: ионная, атомная, молекулярная, металлическая. Элементарная ячейка может иметь форму куба, косогоугольного или прямоугольного параллелепипеда, квадратной или шестиугольной призмы (см. рис. 2.5). Существование кристаллических решеток объясняет анизотропию свойств кристаллов, плоскую форму их граней, постоянство углов и др. законы геометрической кристаллографии. Реальная структура кристалла, всегда отличается от идеальной, поэтому в реальном кристалле имеются различного рода дефекты: примесные атомы, вакансии, дислокации и т. д. (см. *Дефекты в кристаллах*).

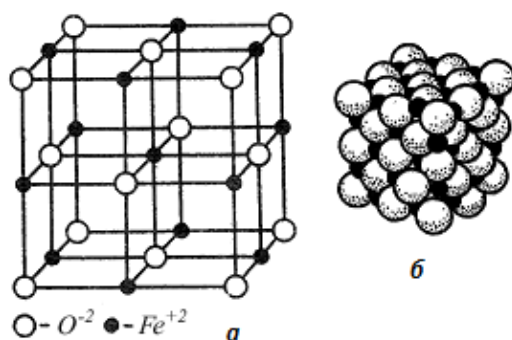


Рис. 2.5. Кристаллическая решетка FeO :
а – схема; **б** – пространственное изображение

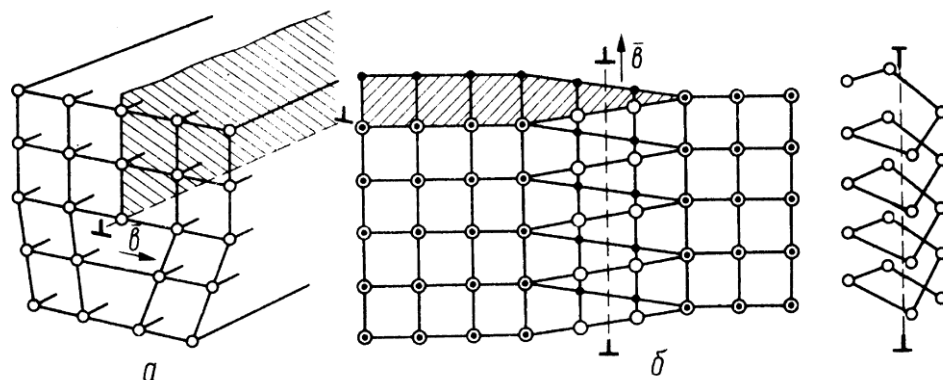
Дефекты в кристаллах – нарушение трансляционной симметрии кристалла, то есть идеальной периодичности определенного положения атомов в узлах кристаллической решетки. Образуются в процессе их роста, под влиянием тепловых, механических и электрических воздействий. Различают: 1) точечные (нульмерные) дефекты, (т. н. *вакансии*), при которых часть атомов отсутствует на местах, соответствующих идеальной схеме решетки; 2) линейные дефекты (одномерные), в реальных кристаллах некоторые атомные плоскости могут обрываться и образовывать на этих краях дислокации; 3) двумерные дефекты (границы двойников, границы доменов, границы зерен и т. д.); 4) объемные дефекты, скопления вакансий, образующие поры, каналы; частицы, оседающие на различных дефектах; скопления примесей.

Дефекты в кристаллах влияют на механические свойства материалов, процессы пластической деформации, разрушения, рекристаллизации, старения, износные явления [30, 46].

Дислокации (от познелат. *dislocatio* – смещение, перемещение) – дефект кристаллической структуры в виде линейного нарушения решетки. Типы дислокаций: а) *краевая*, возникает при обрыве атомных плоскостей внутри

кристалла; б) винтовая, связанная с закручиванием атомных плоскостей в виде винтовой лестницы (см. рис. 2.6).

Рис. 2.6. Типы дислокаций



Металлографические методы исследования – исследования структуры и фазового состава металлов и сплавов, выполняемые в отраженном свете на специальных образцах – шлифах (см. *Шлиф*). Подготовленные специальным образом шлифы исследуются с помощью микроскопов, цветной и черно-белой микрофотографии. Данный метод исследования применяется при изучении структурного и фазового состава поверхностных слоев, их текстуры, физико-химических процессов, происходящих в поверхностных слоях, распределении структурных составляющих, их объеме и форме и др. [30, 46].

Микроструктура – структура металлов и сплавов, видимая с помощью металлографического микроскопа, который позволяет различать строение, размеры и форму кристаллов, наличие различных по своей природе кристаллов, их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот, ориентирование кристаллов, наличие специальных металлографических признаков (двойникование, линии скольжения и др.). Микроструктура металлов и сплавов зависит от химического состава, режимов кристаллизации, термической обработки и пластического деформирования.

Шлиф (нем. *Schliff*, от *schleifen* – точить, шлифовать) – образец металла или металлического сплава, предназначенный для исследования микроструктуры и свойств материала. После вырезки шлиф подвергается специальной обработке, включающей в себя следующие этапы: зачистка, шлифовка (макрошлиф), полировка (микрошлиф) с последующим травлением. Травление производится химически активными веществами или нагревом в газовой среде или вакууме. Например, для сплавов на основе железа в качестве травителя применяют 4 %-ный раствор азотной кислоты в спирте, на основе меди – хлорид железа в соляной кислоте с добавлением дистиллированной воды. Вследствие различия физико-химических свойств отдельных составляющих

структуры материала происходит избирательное травление, окисление и испарение, в результате чего на Ш. образуется макро- либо микрорельеф, а также возникает разная окраска структурных составляющих, благодаря чему в отраженном свете выявляется структура металла (сплава).

Выбор типа шлифа зависит от цели исследования. Для изучения структуры подповерхностных слоев, толщин и структур пленок на поверхности трения, микротвердости слоев применяют *косые шлифы*. Для их получения поверхность полировки наклоняют на некоторый угол к поверхности образца, что «расширяет» сечение образца.

Световая микроскопия – исследование структуры металлов и сплавов с помощью оптического микроскопа с общим увеличением до 2 000...3 000 раз. Методом световой микроскопии изучают размеры, форму, расположение зерен, дефекты кристаллического строения (двойники, дислокации) и т. д. Исследования проводят на специально изготавливаемых микрошлифах (см. *Шлиф*).

Электронно-микроскопические исследования (поверхностей трения) — методы изучения топографии поверхностей трения и структурно-фазовых превращений в тончайшем поверхностном слое с помощью электронного микроскопа. Позволяют наблюдать и исследовать морфологические изменения и аллотропные превращения, реакции в твердой фазе, а также взаимодействие между газом (рабочей средой) и твердой фазой. Необходима тщательная подготовка шлифа, для защиты поверхностных слоев от разрушения и искажения наносится специальное покрытие, например, слой электролитического железа толщиной 300...500 мкм.

Микроскоп электронный – прибор для получения изображений объектов или элементов с увеличения в несколько тысяч раз. Различают: просвечивающие, эмиссионные, растровые (сканирующие), отражательные, зеркальные и теневые электронные микроскопы. Изображение создается с помощью пучков электронов, а для их преломления применяются магнитные (электромагнитные) или электростатические линзы. Исследуемый объект рассеивает, отражает и поглощает электроны. Например, в растровом электронном микроскопе изображение формируется за счет вторичных электронов, появляющихся при сканировании поверхности образца электронным пучком. Изменения состава или топографии поверхности образца, вызывающие изменения поглощения, отражения, рассеяния, дисперсии, эмиссии или поляризации, приводят к появлению в регистрирующей системе, настроенной на соответствующий эффект, изобра-

жения, которое представляет объект как бы видимым при «освещении» используемым излучением. В сочетании с микрорентгеноспектральным анализом возможно получать сведения и о топографии, и о химическом составе образцов. Химический состав поверхностного слоя можно непосредственно изучать качественно, используя полированные нетравленные образцы. Растровые микроскопы используют для изучения рабочих поверхностей материалов трения, исследования которых на просвет практически невозможны, а методом реплик – ограничены. С их помощью также можно изучать массивные объекты, не прибегая к методике реплик со всеми ее недостатками. Разрешающая способность растрового микроскопа достигает 10^{-8} м [46].

Рентгеновский структурный анализ – метод исследования структуры вещества, основанный на наблюдении за дифракционной картиной рентгеновских лучей (распределение в пространстве и интенсивность рассеивания), вызванной их взаимодействием с трехмерной кристаллической решеткой исследуемого объекта. Дифракционная картина зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны 1λ , т. е. порядка размеров атомов. Методами рентгеноструктурного анализа вещества изучают металлы, сплавы, минералы, неорганические и органические соединения, полимеры, аморфные материалы, жидкости и газы и т.д. Наиболее успешно этот метод применяют для установления атомной структуры кристаллических тел, что обусловлено строгой периодичностью их строения.

1.3.2. Машины трения и износа

Машины трения и износа – специализированные и универсальные испытательные установки, использующиеся для исследования: материалов на трение, изнашивание и заедание; износостойкости в различных условиях смазывания; служебных характеристик материалов; фрикционной термостойкости материалов; антифрикционности материалов и т. д. На исследовательских машинах трения (стендах) можно реализовать широкую гамму разнообразных внешних условий и видов трения [7, 8, 11, 15, 25, 31, 54].

Схемы трения, используемые в разнообразных машинах трения, представлены на рис. 2.7.

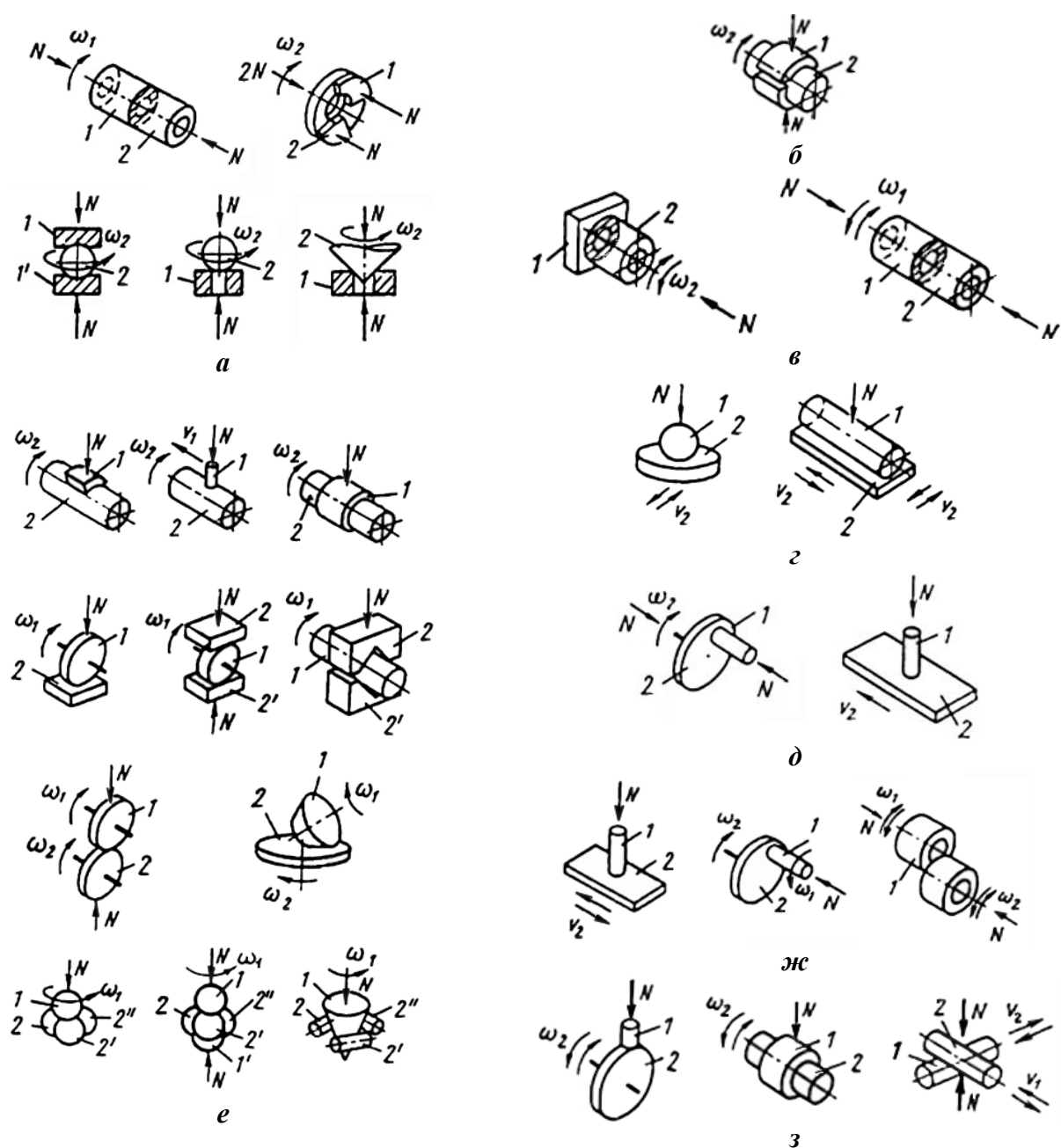


Рис. 2.7. Типовые схемы трения, реализуемые в испытательных установках [48]:
а – торцевые схемы трения при однонаправленном движении ($0,5 < K_t \leq 1$); **б** – схема трения по образующей при однонаправленном движении ($0,5 < K_t \leq 1$); **в** – торцевые схемы при знакопеременном движении ($0,5 < K_t \leq 1$); **г** – схемы трения по образующей при знакопеременном движении ($0,5 < K_t \leq 1$); **д** – торцевые схемы при однонаправленном движении ($0 < K_t \leq 0,5$); **е** – схемы трения по образующей при однонаправленном движении ($0 < K_t \leq 0,5$); **ж** – торцевые схемы при знакопеременном движении ($0 < K_t \leq 0,5$); **з** – трение по образующей при знакопеременном движении ($0 < K_t \leq 0,5$) (1 и 2 – тело и контртело, N – нагрузка на контакт, ω – угловая скорость, v – линейная скорость перемещения, K_t – коэффициент взаимного перекрытия)

СМЦ-2 – лабораторная испытательная установка для исследования антифрикционных материалов при трении скольжения, трении качения и трении

качения с проскальзыванием (рис. 2.8). Схемы контакта: при трении скольжения – вал – вкладыш; при трении качения – периферии дисков. Вращение на бабку 4 и вал 5 нижнего образца передается от электрического привода 1 через клиноременную передачу и контрпривод 2. Верхний образец размещается на валу 6 в бабке 7. Нагрузка задается устройством 8, содержащим тарированную пружину и серьгу. Момент трения регистрируется индуктивным датчиком 3 по скручиванию торсионного валика. Величины, характеризующие процесс трения, записываются синхронно на ленте электронного потенциометра.

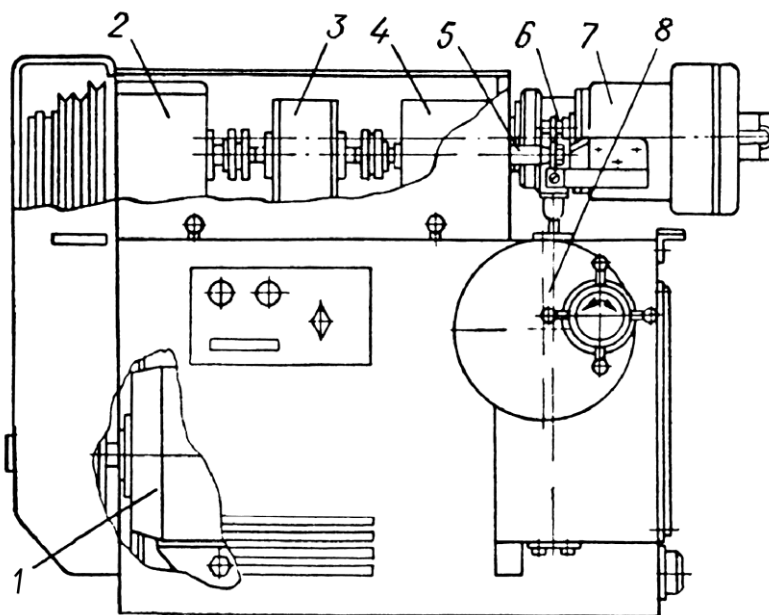


Рис. 2.8. Схема машины трения СМЦ-2

Технические характеристики:

Диаметр контртела, мм

≤50

Частота вращения шпинделя 1/мин

300; 500; 1000

Нагрузка, Н

≤5000

Проскальзывание круглых образцов, %

10...20

УМТ-1 – лабораторная испытательная установка для исследования материалов на трение в широком диапазоне нагрузок и скоростей скольжения. Отличительной особенностью машины является возможность работы по различным наиболее распространенным схемам контакта: пальчиковый образец – диск, торцы колец, вал – вкладыш (рис. 2.9). Машина состоит из электромеханического привода 2, 3 с бесступенчатой регулировкой частоты вращения шпинделя, приводимого во вращение асинхронным электродвигателем 1. На шпинделе располагается образец (контртело), например, диск 5, к которому с заданной силой F прижимается исследуемый образец, например палец 6, распо-

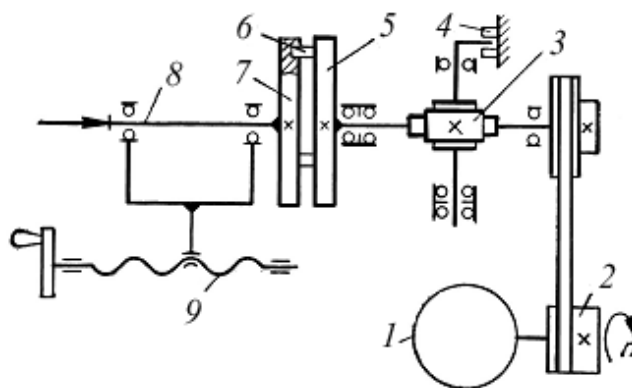


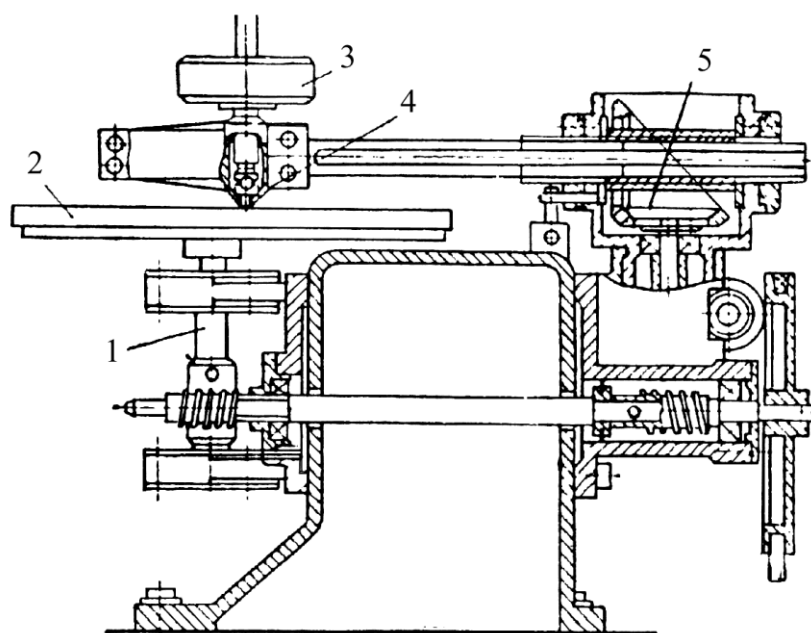
Рис. 2.9. Схема машины трения УМТ-1

женный в образцедержателе 7. Последний располагается в узле нагрузки и измерений 8, перемещаемом вдоль оси с помощью устройства 9. В процессе испытаний измеряют: нагрузку на образцы, частоту вращения шпинделя (датчиком 4) и момент трения. На ленте самопишущего прибора регистрируются момент трения и температура неподвижного образца.

Технические характеристики:

Мощность привода, кВт	≤25
Рабочая нагрузка, Н	200...4000
Погрешность измерений нагрузки, %	≤2,5
Частота вращения шпинделя, 1/мин	15...3000
Погрешность измерений частоты, %	≤5
Момент трения, Н·м	2...40
Погрешность измерений момента, %	≤4
Радиус установки пальчиковых образцов, мм	60; 90; 120; 150
Диаметр диска, мм	350
Диаметр пальчикового образца, мм	5 и 10
Длина пальчикового образца, мм	20
Наруж. диаметр кольца, мм	28
Внутр. диаметр кольца, мм	16
Толщина, мм	15
Внутр. диаметр втулки, мм	35...40
Наруж. диаметр втулки, мм	50
Длина, мм	10; 15; 20

Х4-Б – лабораторная испытательная установка для исследования изнашивания материалов закрепленным абразивом. Схема контакта: пальчиковый образец – торец диска (рис. 2.10). Абразивная шкурка закрепляется на торце диска



ка 2, вращающегося вокруг оси 1. Пальчиковый образец 4 прижимается к поверхности диска грузом 3. Механизм 5 позволяет производить испытания по одному следу либо по свежей поверхности при радиальном перемещении образца. Результаты испытаний оцениваются по эталону.

Рис. 2.10. Схема машины трения Х4-Б

Технические характеристики:

Диаметр диска, мм	250
Диаметр образца, мм	2
Длина образца, мм	15...20
Частота вращения диска, 1/мин	60
Нагрузка, Н	3

Четырехпостовая машина трения – лабораторная испытательная уста-

новка, позволяющая производить исследования в условиях трения скольжения при возвратно-поступательном движении образцов (рис. 2.11). Устройство состоит из ползуна 1, перемещающегося на шарико-подшипниках, к которому болтами крепятся два установочных элемента, выполненных в виде призм

2. Цилиндрические образцы 3 крепятся в призмах при помощи сухаря 4 с винтом 5, сменных планок 6 с центрами 7. Образцы имеют с одного торца диаметрально расположенные скосы и центровые отверстия на противоположных торцах. Планки 6 крепятся к призме 2 винтами 8. Неподвижные образцы 9 устанавливаются в окна вертикальных стенок устройства. Установка позволяет обеспечить скорость относительного перемещения образцов до 2 м/с, при длине хода ползуна 130 мм и давление на поверхности трения до 20 МПа. Установка создана в НКИ (НУК).

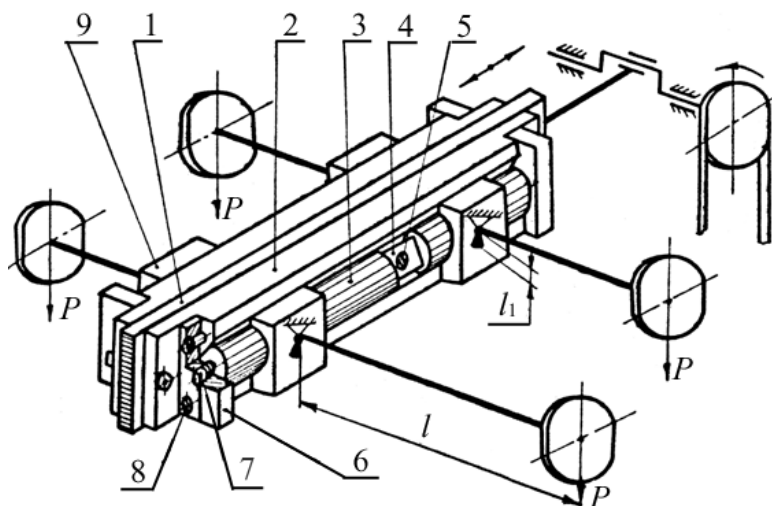


Рис. 2.11. Схема четырехпостовой машины трения

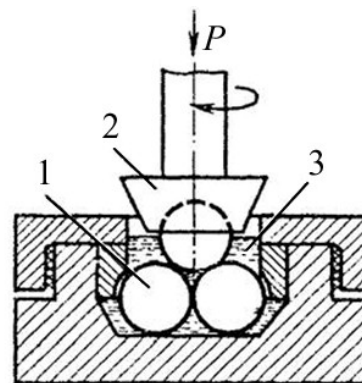


Рис. 2.12. Схема нагружения четырехшариковой машины трения:

- 1 – неподвижные шарики;
- 2 – вращающийся шарик;
- 3 – исследуемое масло

Четырехшариковая машина трения – лабораторная испытательная установка, предназначенная для исследования смазывающей способности масел. Схема контакта: шарик по трем шарикам (рис. 2.12). Критериями температурной стойкости масел являются критическая температура разрушения смазочного слоя и температура хими-

ческих модификаций смазочного материала, а критерием разрушения масляной пленки является скачок силы трения.

Диаметр шариков 12,7 мм, материал – закаленная сталь ШХ15. Верхний шарик закреплен во вращающемся шпинделе. Во время испытания он прижимается с заданной нагрузкой к трем неподвижным нижним шарикам. Частота вращения шпинделя – 1460 ± 70 об/мин. Длительность испытаний 10 ± 2 с. На четырехшариковой машине трения по стандартной методике определяют противоизносные противозадирные и антифрикционные свойства смазочных материалов, нагрузку разрушения смазочного слоя $P_{кр}$, нагрузку схватывания $P_{схв}$ и индекс задира.

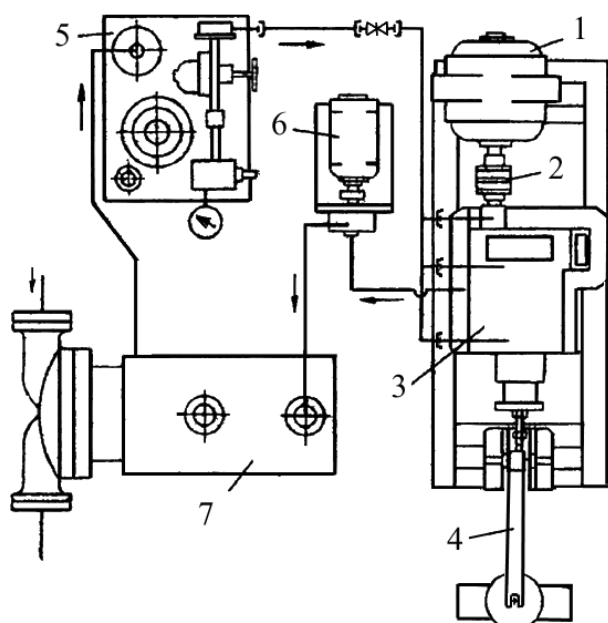


Рис. 2.13. Схема машины трения РМ

РМ (Роликовое Моделирование) – лабораторная испытательная установка для исследования контактной выносливости и заедания на конических образцах, моделирующих косозубое зацепление (рис. 2.13). Состоит из электродвигателя переменного тока 1 (мощность 13 кВт, 3000 1/мин), соединительной муфты 2, собственно машины для испытания роликов 3, нагрузочного устройства 4, нагнетательного масляного насоса с электромотором 5 (совместно с бачком для масла, масляным фильтром, редукционным клапаном), отсасы-

вающего масляного насоса 6 и маслоохладителя 7. Оснащена измерительным комплексом, позволяющим определять: температуру рабочих поверхностей с помощью термопар; толщину масляной пленки емкостным, индукционным и люминесцентным методом. С помощью стробоскопа имеется возможность визуального наблюдения за трибоповерхностью в работе. Испытания на этих машинах отличаются высокой воспроизводимостью результатов опытов в связи с хорошим распределением нагрузки по контактной линии. Испытания материалов зубчатых колес производятся в большом диапазоне приведенных радиусов кривизны рабочих поверхностей образцов. Установка разработана в НКИ (НУК) [31, 37, 51].

РМТ (Реверсивная машина трения) – лабораторная испытательная установка предназначена для испытаний тяжело нагруженных (до 150 МПа) подшипников скольжения при возвратно-вращательном неполноповоротном движении (рис. 2.14). Установка состоит из станины 1, жестко закрепленного на станине вала 2 с шейками для установки испытуемых подшипников 3, обоймы 4 для установки корпусов 5 испытуемых подшипников, механизма 6 радиального нагружения и элемента 7 регистрации момента трения. Механизм возвратно-вращательного движения содержит раму 8, выполненную в виде кольца, установленную на одной оси с испытуемым подшипником 3. Рама 8 с помощью ребер 9 жестко соединена с обоймой 4. На наружной цилиндрической поверхности рамы 8, с помощью устройств 10 и 11, шарнирно закреплены два гибких элемента 12 и 13, свободные концы, которых соединены соответственно с источниками 14 и 15 движения. Установка позволяет приблизить испытания подшипников к реальным условиям работы путем сохранения скорости испытуемых подшипников постоянной в течение цикла качания и расширить диапазон углов поворота при проведении испытаний. Разработана в НИИ (НУК) [31, 54].

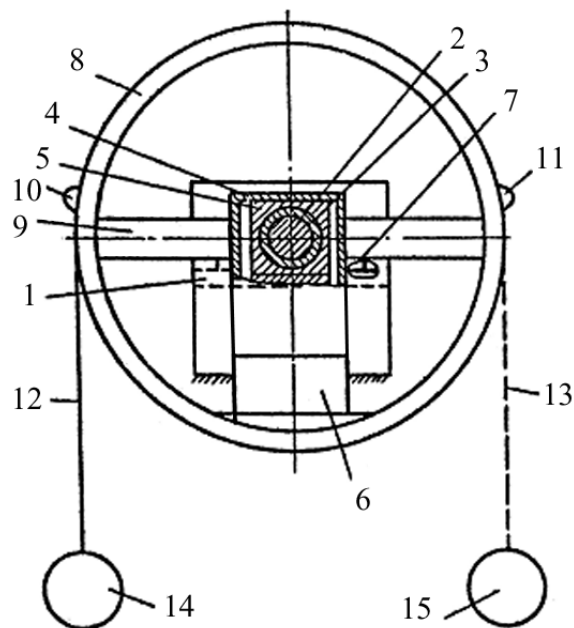


Рис. 2.14. Схема машины трения РМТ

У-44 – лабораторная испытательная установка, предназначенная для исследования высокоскоростных зубчатых передач мощных редукторов и работоспособности упорных дисков, воспринимающих осевые усилия косозубой зубчатой передачи, упорно-опорных подшипников и для испытаний зубчатых колес на контактную и изгибную выносливость. Установка (мощностью 2940 кВт) имеет два одинаковых мультипликатора, закрепленных на общей фундаментальной раме (рис. 2.15). Ведущие валы мультипликаторов соединены пружиной, представляющей собой пустотелый вал с наружными шлицами на фланцах. Ведомые валы соединяются шлицевыми валами с нагрузочной муфтой. Привод от электродвигателя осуществляется через шлицевую муфту. Цилиндрические двухступенчатые мультипликаторы конструктивно представляют собой самостоятельные узлы. Установку обслуживают две автономные масляные системы. Приводом установки является электродвигатель постоянного тока с

Стенд для испытания радиальных, радиально-упорных и упорных подшипников скольжения. С целью повышения нагрузочной способности гидродинамических упорных подшипников с кольцевой пятой были разработаны подпятники, имеющие различные формы рабочей поверхности [31].

93

Рис. 2.17. Схема контроля толщины масляной пленки и температурного режима

Стенд "Газовое кольцо". С целью изучения влияния цикличной работы

Рис. 2.18. Схема стенда "Газовое кольцо"

фильтр-осушитель 4, дросселируется регулирующим вентилем 11 и поступает во всасывающую полость компрессора. Заданные давления всасывания и нагнетания устанавливаются регулированием заполнения системы хладагентом из газового ресивера 5 регулирующим вентилем 11. Перегрев хладагента на всасывании достигается регулированием расхода воды через теплообменник 8. Расход воды через теплообменник контролируют ротаметром 10, давление паров хладагента на всасывании – манометром 3. Температура паров на всасывании регистрируется термометром (на схеме не показан). Защита компрессора от недопустимого повышения или понижения давления в системе осуществляется двухпозиционным реле давления 2. Стенд снабжен также запорными вентилями 6, 12, термометрами для контроля температуры воды на входе и выходе из теплообменника, водяным фильтром 9.

Контрольно-измерительный комплекс стенда включает в себя: контрольно-измерительную аппаратуру для управления режимом работы компрессора (КЭП – 12 УЭ) – основной режим: $T_0 = 278\text{ K}$, $T_K = 313\text{ K}$, на R 22; прибор ПТМП-3Т для преобразования изменения емкости датчиков в сигнал постоянного тока; осциллограф Н-102; отметчик времени П-102; магазин сопротивлений Р-155; тарировочное устройство для контроля прибора ПТМТ-3Т.

Для диагностирования изменений зазоров в сопряжениях и измерения температур поверхностей трения детали компрессоров препарировались чувствительными датчиками и термопарами. Время выхода компрессора на номинальную частоту вращения регистрировалось с помощью фотопреобразующего устройства, встроенного в герметичную полость компрессора. На стенде проведен ряд экспериментальных работ как по изучению пускового изнашивания, так и связанных с установлением достоверности расчетных методик определения долговечности трибосопряжений. Совместными усилиями ОНИЛ НСМ НКИ (НУК) и проектантами судовых кондиционеров увеличен ресурс указанных компрессоров с $20 \cdot 10^3$ до $60 \cdot 10^3$ часов. В экстремальных условиях работают также опоры на газовой смазке. В ОНИЛ НСМ выполнен ряд теоретических и экспериментальных работ по этой тематике.

Методы определения толщины масляной пленки:

~ емкостный – используется для измерений и регистрации толщин, перемещений и сил. Реализуется емкостными датчиками с изменяемым зазором, площадью зазора или диэлектрической проницаемостью. Измеряющее устройство состоит из датчика вала, токосъемника, электронного прибора, блока питания и осциллографа. Изменение емкости датчика, включенного в контур за-

дающего генератора высокой частоты, связанное с колебаниями толщины масляной пленки в результате вращения датчика вала и условиями испытаний, вызывают соответствующие изменения частоты генерируемого напряжения. Усиленный и преобразованный импульс регистрируется шлейфовым осциллографом, на пленке которого отображается эпюра силы тока электронного прибора. Сила тока является функцией соответствующей емкости датчика, а, следовательно, и толщины масляной пленки, изменяющейся с углом поворота вала. Датчик вала изолируется от вала, точно фиксируется и протачивается с валом для образования общей поверхности, с помощью проводников соединяется с токосъемником. Устройство позволяет непрерывно фиксировать изменение толщины масляной пленки по окружности в исследуемом сечении, перпендикулярном к оси вала. Для получения связи между силой тока, записанной на осциллограмме, и толщиной масляной пленки используют специальный тарировочный прибор. Емкостный метод используется, в частности, для определения толщины масляной пленки в подшипниках жидкостного трения.

~ *люминесцентный* – бесконтактный способ измерения толщины масляной пленки посредством измерения яркости люминесцентного свечения слоя смазки, облучаемого ультрафиолетовым светом. Преимущества метода: высокая чувствительность в зоне малых величин смазочных пленок (до 1...1,5 мм); возможность измерения без применения сложных токосъемных устройств, вносящих дополнительные погрешности; отсутствие прямого воздействия на состояние и свойства материалов и масел, находящихся в контакте, что является особенно существенным при изучении граничного трения и противозадирной стойкости контактов качения со скольжением. Основным недостатком метода является то, что измерение смазочного слоя производится вне зоны контакта после выхода масла из контакта.

Неразрушающие методы испытаний – методы контроля надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов (узлов), не требующий выведения объекта из работы либо его демонтажа. Также существует понятие *разрушающего контроля* (например, краш-тесты).

Основными неразрушающими методами испытаний являются:

- визуальный контроль – выявление видимых дефектов типа заусенцев, вмятин, раковин, ржавчины, прижогов, наплывов, и др.;
- магнитный контроль, основанный на анализе взаимодействий магнитного поля с контролируемым объектом – выявление дефектов ферромагнитных материалов, к которым относятся никель, железо, кобальт и сплавы на их осно-

ве (индукционный метод, феррозондовый, магнитографический, пондеромоторный, магниторезисторный);

- оптический контроль – регистрация параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом (визуально-оптический, интерференционный, нефелометрический, голографический, рефрактометрический, рефлексометрический);

- акустический (ультразвуковой) – регистрация параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте;

- проникающими веществами – основан на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта (яркостный (ахроматический), цветной (хроматический), люминесцентный, метод фильтрующихся частиц, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, галогенный);

- радиационный – регистрация и анализ проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Метод может называться по конкретному виду ионизирующего излучения, например, рентгеновский, нейтронный и т. д. (сцинтилляционный, ионизационный, метод вторичных электронов, радиографический, радиоскопический методы);

- электрический – основан на анализе взаимодействия электрического поля с контролируемым объектом (электростатический порошковый метод, электропараметрический, электроискровой, рекомбинационного излучения, экзоэлектронной эмиссии, контактной разности потенциалов);

- вихретоковый – основан на анализе электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте (трансформаторный, параметрический методы контроля);

- виброакустический – основан на регистрации параметров виброакустического сигнала, создаваемого работающим контролируемым объектом (пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический методы контроля);

- радиоволновой – основан на анализе взаимодействия электромагнитных волн радиодиапазона с контролируемым объектом (детекторный (диодный) метод, болометрический, термисторный, интерференционный, голографический, метод жидких кристаллов, метод термобумаг, термолюминофоров, метод фотоуправляемых полупроводниковых пластин, калориметрический метод);

- тепловой – основан на регистрации и анализе изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов. Например, повышение температур при перегрузках, зоны пониженной температуры при нарушении цело-

стности и т. п. (пирометрический, метод жидких кристаллов, метод термокрасок, термобумаг, термолюминофоров, термозависимых параметров, оптический, калориметрический).

Юстировка (от нем. justieren – выверять, регулировать, от лат. jusus – правильный) – приведение средств измерений в состояние, обеспечивающее их правильное функционирование, то есть устранение погрешностей, выявленных в результате контроля или поверки средств измерений.

Градуировка средств измерений, тарировка – метрологическая операция, состоящая в нанесении шкалы на средство измерения, определение нулевого показания используемого прибора.

Точность – степень близости результатов измерений к истинному значению измеряемой величины. Оценивается погрешностью измерения – разностью между действительным и истинным значениями параметра. Поскольку истинное значение не может быть определено экспериментально, так как все средства измерения имеют некоторую погрешность измерения, в качестве него принимают действительное значение параметра, определенное другим средством измерения, с погрешностью на порядок меньше допустимого значения для данной цели.

ГЛАВА 2. ОТРАБОТКА ИЗДЕЛИЯ НА ТРИБОТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

2.1. Принципы создания долговечных пар трения. Жизненный цикл изделия. Обеспечение триботехнологической надежности

Триботехнологическая надежность. – надежность пары трения (системы пар трения), задаваемая техническими условиями и обеспечиваемая на этапах проектирования, технологических процессов и изготовления изделия. Обеспечение триботехнологической надежности состоит в решении ряда оптимизационных задач (конструкция, материал, физико-механические свойства и другие особенности изделия), в соответствии со служебным назначением и условиями эксплуатации изделия, а также с экономическими требованиями. Результатом итерационного процесса отработки изделия на триботехнологичность должно стать получение изделия наивысшего качества в пределах заданных временных и финансовых ограничений. Триботехнологическая надежность изделия должна обеспечиваться на всех этапах жизненного цикла изделия – от разработки требований, проектирования и производства до его монтажа, доводки, испытания, эксплуатации, ремонта и восстановления. При этом качество объекта оценивается параметрами долговечности, отказов, ресурса и др.

Жизненный цикл изделия – период от возникновения потребности в создании продукции до ее ликвидации вследствие истощения потребительских свойств. Процесс создания изделия состоит из ряда повторяющихся операций и он цикличен. Основные этапы жизненного цикла:

- **Стадия НИОКР.** Доля затрат на эту стадию определяется наукоемкостью изделия и служит основной характеристикой инновационности и стратегической перспективности производства. Основные работы: фундаментальные исследования; поисковые исследования; прикладные исследования; изготовление и исследование экспериментальных образцов, узлов; разработка конструкторской документации на основе ЕСКД; опытное производство; конструкторские испытания; технологические разработки и испытания.

- **Стадия производства.** На стадии производства на всех технологических этапах (от производства заготовок до стадии отгрузки готовых изделий) осуществляется: конструкторская подготовка производства; технологическая подготовка производства; производство опытных партий; мелко-серийное, серийное и крупносерийное производство; вспомогательное производство.
- **Стадия реализации.** На этой стадии изделия поступают на рынок, начинается жизненный цикл товара.
- **Стадия обслуживания (сервиса):** производство запасных частей; предпродажное, гарантийное, ремонтное и техническое обслуживание; эксплуатационное обслуживание; модернизация; утилизация.

Прогнозирование надежности и ресурса ведется с использованием вероятностных моделей с привлечением статистических сведений об изменениях механических и физико-химических свойств материалов, действующих нагрузок, условий эксплуатации, влияния окружающей среды и др.

Прогнозирование ресурса на *стадии проектирования* состоит в согласовании ожидаемых показателей с заданными, на *технологическом этапе* – в согласовании действительных показателей с заданными, а на *стадии эксплуатации* – в оценке остаточных показателей ресурса, причем оценка производится на основании данных о его состоянии с учетом истории нагружения.

Вероятностная природа накапливаемых в процессе эксплуатации поверхностных повреждений и разрушений является причиной значительного статистического разброса оценки долговечности по критерию износа. Накопление достоверной статистической информации по отказам трибосистем позволяет получить достоверные математические модели для оценки их надежности и ресурса. Знание функции распределения долговечности узлов трения дает возможность установить сроки между капитальными ремонтами, объемом выпуска запасных частей, предусмотреть ремонтные работы, выбрать оптимальные конструктивно-технологические решения.

Повышение триботехнологической надежности технических систем возможно по нескольким направлениям:

- создание и разработка специализированных узлов: опоры с газовой смазкой; магнитные подвесы; самосмазывающиеся узлы; прецизионные узлы; магнитожидкостные триботехнические системы и т. п.;
- создание и исследование материалов трибологического и биомеханического назначения: многофункциональные материалы (металлофторопла-

стовые, сталь-бронзовые, свинцовисто-бронзовые ленты и т. п.); износостойкие легированные чугуны и стали; сплавы и спеченные порошковые антифрикционные и фрикционные материалы; антифрикционные пластмассы, эластомеры; композитные материалы; керамика, графиты;

- создание и исследование смазочных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами: единые моторно-трансмиссионно-гидравлические масла; низкозастывающие масла на синтетической основе; противоизносные, противозадирные, антифрикционные присадки; материалы, инициирующие избирательный перенос при трении; многоцелевые и универсальные всесезонные смазочные материалы; специальные фрикционные жидкости; твердые смазочные материалы и покрытия;
- создание и исследование прогрессивных технологий макро- и микропрофилирования трибоповерхностей, обеспечивающих высокую несущую способность и долговечность;
- исследование и разработка технологий и методов упрочнения, нанесения покрытий и модифицирования трущихся поверхностей деталей: вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий и модифицирования поверхностей (имплантация); детонационные методы нанесения покрытий; плазменные методы; лазерная технология; СВС-процессы²; нанесение покрытий методами химического осаждения из газовой фазы; традиционные методы упрочнения (химико-термические, наплавка, ППД и др.);
- разработка методов физического и математического моделирования узлов трения (расчетно-теоретические модели, ресурсное проектирование; методы и средства ускоренных триботехнических испытаний; многопараметрическая диагностика и трибомониторинг; экспертные трибосистемы; трибоинформатика, банки данных и системный анализ, разработка САПР);
- подготовка специалистов – трибологов и триботехнологов, в том числе организация на предприятиях и в конструкторских бюро служб по обеспечению надежности по критериям износа и потерь на трение;
- обеспечение ресурсного проектирования по критериям износостойкости в виде отработки изделия на триботехнологичность.

² СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез

Триботехнологичность – свойство поверхности, пары трения, узла, машины необходимое и достаточное для обеспечения заданного ресурса при минимальных затратах на проектирование, изготовление и эксплуатацию изделия.

Наукоемкое изделие (НЕИ) можно характеризовать такими основными признаками:

- сложные функциональные требования различной физической природы обеспечиваются сложным взаимосвязанным комплексом систем (топливная, смазки, воздушная, гидравлическая, электрическая и др.) и узлов (компрессор, камера сгорания, турбина, редуктор, реверсивное устройство и т. п.);
- номенклатура деталей, систем и узлов велика; детали конструктивно и технологически чрезвычайно сложны и разнообразны; например, в судовом газотурбинном двигателе свыше 5000 наименований деталей и свыше 50000 – их общее количество;
- высокие значения параметров рабочего процесса (давление, температура, скорость) приводят к сложным видам нагружения деталей и узлов; возникающие сложные напряженно-деформированные состояния являются причиной большого разнообразия видов повреждений;
- функционально-надежностные параметры НЕИ требуют адекватного отклика триботехнологии: точностного ужесточения конструкции и технологии, использование широкой номенклатуры материалов и технологий упрочнения;
- создание НЕИ непрерывно сопровождается, на каждом этапе жизненного цикла НЕИ решением оптимизационных задач по отработке на триботехнологичность конструкции, технологии изготовления, упрочнения, сборки, монтажа, испытаний и эксплуатации.

Для прогнозирования ресурса конкретных типов и классов машин необходимо установить фактическую нагруженность узлов трения (по силовым, тепловым, вибрационным и пр. параметрам), обосновать оптимальные зазоры в сопряжениях, допускаемые величины износа и параметры предельных состояний.

Всестороннее изучение механизмов повреждений при износных явлениях, исследование предельных состояний и кинетики развития отказов и накопленный в результате фактический материал должны учитываться при дальней-

шей разработке триботехнологических рекомендаций при конструировании, создании и эксплуатации техники.

Создание в проектных и конструкторских бюро, на предприятиях и в ремонтных бюро специальных служб, ответственных за обеспечение работоспособности и надежности узлов трения на всех стадиях проектирования, изготовления, доводки, эксплуатации и ремонта, позволит во многом решить проблему трибологической надежности машин. Немало этому должно способствовать широкое использование баз данных, создание общего банка информации с последующей передачей трибологических сведений конструкторам, технологом, эксплуатационникам, что должно ускорить оперативное и эффективное внедрение достижений трибологии в практику создания надежных и долговечных систем.

Успешное решение проблемы повышения трибологической надежности невозможно без научно-прикладных исследований процессов трения, износа и смазки, методов физического и математического моделирования, разработки износостойких материалов, покрытий, смазочных материалов, поверхностных упрочняющих технологий, оптимизации узлов трения машин, оборудования, приборов, инструментов, разработки методов и средств диагностики, а также обеспечения состояния безопасности, экологичности изделий.

2.2. Основные этапы отработки изделия на триботехнологичность

Поскольку в большинстве механических систем надежность и ресурс зависят от износowych явлений, и причины отказов чаще всего формируются на стадии изготовления, то есть на технологическом этапе, представляется целесообразным надежные проблемы механических систем анализировать и контролировать на этапе отработки конструкции на технологичность, введя раздел отработки на триботехнологичность [33].

Так же как и при отработке на технологичность, критерием триботехнологичности изделия является экономическая целесообразность при заданных условиях производства, эксплуатации и ремонта. Оработка изделия на триботехнологичность должна обеспечивать повышение его надежности при снижении трудоемкости и себестоимости.

Оработка на триботехнологичность должна осуществляться на всех стадиях жизненного цикла изделий – от разработки эскизного проекта вплоть до

разработки рабочей документации для серийного производства. Исполнитель отработки конструкции изделия на триботехнологичность должен обладать не только знаниями конструктора и технолога, но и быть компетентным в области трибологии.

Требования к триботехнологичности на каждой из стадий специфически определены, но подчиняются общей методологии.

Качественный алгоритм отработки НЕИ на триботехнологичность

- Методология отработки НЕИ на триботехнологичность, рис. 2.19

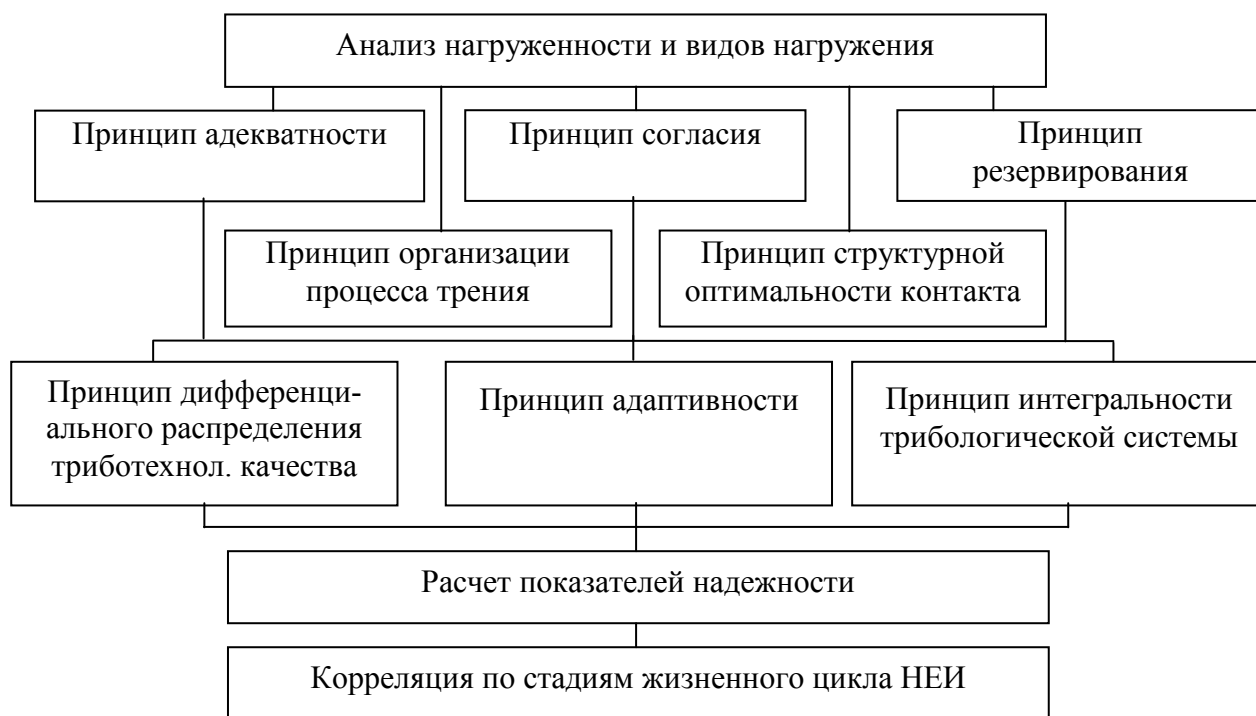


Рис. 2.19. Методология отработки НЕИ на триботехнологичность

- Анализ нагружений исследуемых узлов: вид, характер воздействия, предельные значения, время воздействия и др. Нагружения имеются в виду как механические, так и др. рода, рис. 2.20.



Рис. 2.20. Виды нагружений деталей и узлов НЕИ

- Анализ видов повреждений деталей и узлов НЕИ (рис. 2.21).



Рис. 2.21. Виды повреждений деталей и узлов НЕИ

- Определение видов трения – по кинематическому признаку и по наличию смазочного материала.
- Определение видов изнашивания с выделением ведущего и исключением недопустимых и случайных, вызванных нарушениями в конструкции, производстве и эксплуатации (режимы работы, сорт смазки и т. п.).
- Определение главной пары трения и пары минимального ресурса механизма. Главная пара трения обеспечивает основной технический параметр изделия, пара минимального ресурса – его ресурс. Такое разделение позволяет определить пару трения, увеличение ресурса которой наиболее целесообразно и экономически оправданно в зависимости от того, какие задачи стоят перед триботехнологом – повышение технико-экономических показателей изделия, его ресурса или же комплексные требования.
- Определение триботехнологического принципа, который позволит решить проблему обеспечения ресурса.
- Выбор направления оптимизации – той характеристики, изменение которой даст необходимый результат. Это может быть снижение коэффициента трения, контактных напряжений, повышение износостойкости поверхности, уменьшение температуры в зоне трения, внесение резервных свойств и т. д.
- Выбор зоны оптимизации – тело, контртело, смазочный материал, то есть выбор того объекта, в котором конструктивно и технологически изменения вносить проще, дешевле и эффективнее.
- Выбор метода оптимизации триботехнологического качества – путь изменения свойств тела, контртела или смазочного материала. Например, для снижения коэффициента трения можно изменить материал (серый чугун заменить высокопрочным), изменить свойства материала (твердость), свойства по-

верхности (микро- и макрогеометрия), условия смазывания, смазочный материал и т. д.

- Расчет параметров и характеристик технологического процесса, обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства (режимы резания, упрочнения, др. видов обработки, инструмента, технологических сред, оснастки и т. п.).

- Разработка материально-технического обеспечения техпроцесса (проектирование и изготовление обрабатывающего и контрольного инструмента, оснастки, оборудования).

- Изготовление и испытание опытного образца изделия (узла, пары трения и т. п.).

- Разработка технологического процесса опытной партии изделия.

- Определение триботехнологических показателей изделия. Внесение корректировки в принятые технические решения. Подготовка к серийному выпуску изделия.

Приведенный качественный алгоритм отработки изделия на триботехнологичность (рис. 2.22) дает общее представление о методике. Конкретное изделие потребует уточнения.

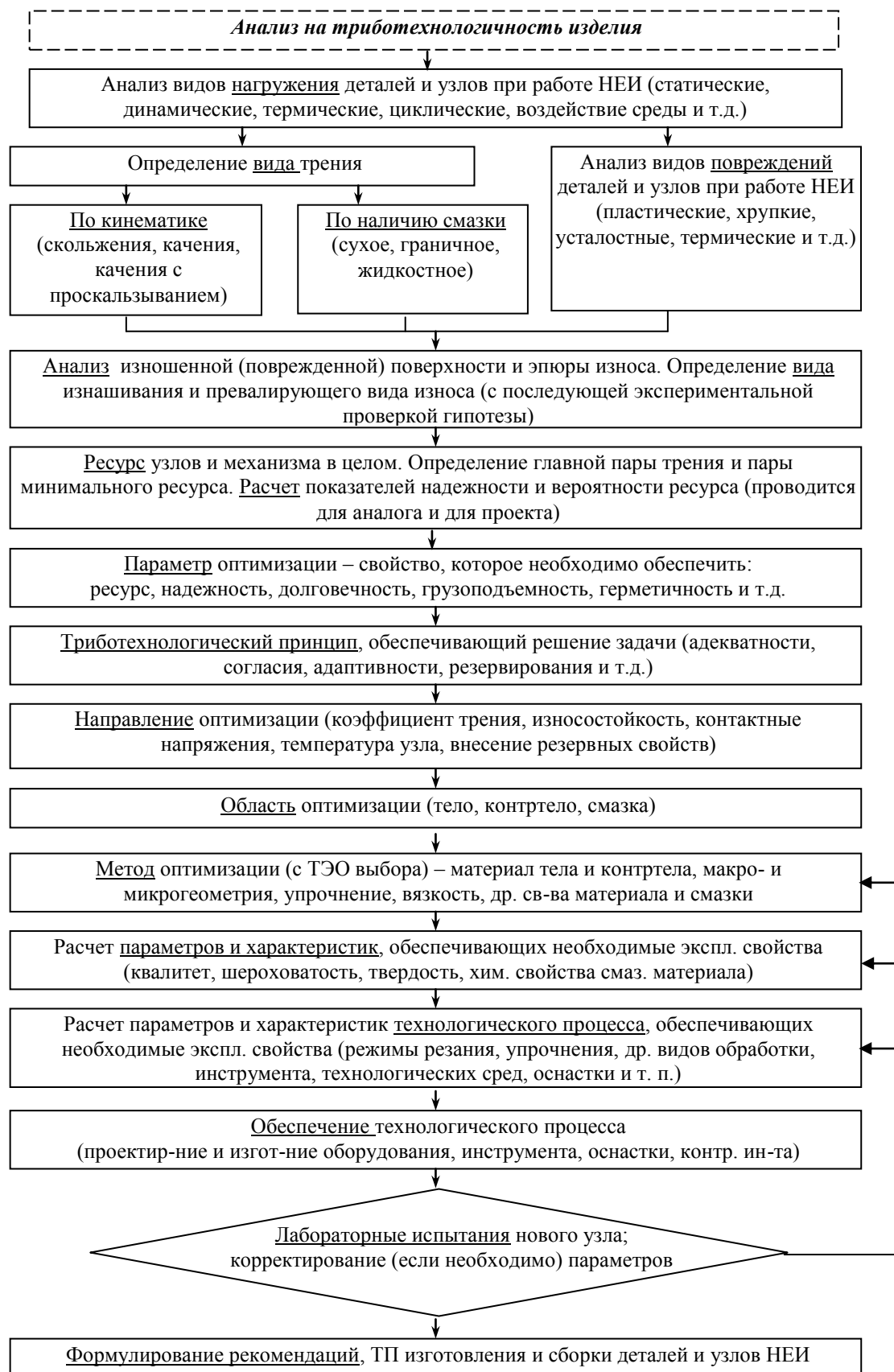


Рис. 2.22. Алгоритм отработки наукоемкого изделия на триботехнологичность

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ ТРИБОСИСТЕМ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

3.1. Основные материалы трибосопряжений и узлов трения

Чугуны и их применение

Чугун – сплав железа с углеродом (не менее 2,14 %) и другими элементами). Чугуны содержат постоянные примеси (Si, Mn, S, P), а в некоторых случаях также легирующие элементы (Cr, Ni, V, Al и др.). Углерод в чугуне может содержаться в виде цементита и графита. В зависимости от формы графита и количества цементита, выделяют белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны.

Серый чугун (СЧ) при малом сопротивлении растяжению имеет достаточно высокое сопротивление сжатию. В химический состав серого чугуна наряду с углеродом (3,2...3,5 %) входят кремний (1,9...2,5 %), марганец (0,5...0,8 %) и фосфор (0,1...0,35 %). С увеличением углерода и кремния увеличиваются степень графитизации и склонность к образованию ферритной структуры металлической основы, что ведет к разупрочнению чугуна без повышения пластичности. Лучшими прочностными триботехническими свойствами среди серых чугунов обладают чугуны с перлитной структурой. Серые чугуны применяются в станкостроении (зубчатые колеса, направляющие и т. д.), в авто- и тракторостроении для изготовления блоков цилиндров, поршневых колец, толкателей, седел клапанов, дисков сцепления.

Ковкий чугун (КЧ) получают длительным нагревом при высоких температурах (отжигом) отливок из белого чугуна, в результате получают графит хлопьевидной формы. Химический состав белого чугуна, предназначенный для ковкого чугуна: 2,5...3,0 % С; 0,7...1,5 % Si; 3...1,0 % Mn; до 0,12 % S; до 0,18 % P. По механическим и технологическим свойствам занимает промежуточное положение между сталью и серым чугуном. Мелкие отливки, преимущественно из ферритного ковкого чугуна, используются в различных отраслях промышленности: авто- и тракторостроении; дорожном и сельскохозяйственном машиностроении. Из ферритно-перлитного чугуна изготавливают вилки карданных валов, ролики цепных конвейеров, тормозные колодки и т. д.

Высокопрочный чугун (ВЧ) получают путем добавления в жидкий чугун небольшого количества щелочи или щелочноземельных металлов – чаще всего

магния (0,03...0,07 %). По содержанию остальных элементов этот чугун не отличается от обычного серого. Обладают высоким пределом текучести – $\sigma_T = 300...440$ МПа, что выше предела текучести стали, достаточно высокой ударной вязкостью и сопротивлением усталости. ВЧ хорошо обрабатываются резанием, имеют высокую износостойкость, обладают способностью гасить вибрации. Изготавливают поршневые кольца; коленчатые валы большой массы (до 2000...3000 кг, взамен кованых валов из стали); детали турбин; валки прокатных станов; направляющие, суппорты и другие детали металлорежущих станков. Детали из высокопрочного чугуна имеют лучшие антифрикционные свойства и значительно дешевле в изготовлении стальных.

Антифрикционные чугуны содержат легирующие элементы: 0,3...1,5 % Cu (все марки); 0,2...0,4 Cr (АЧС-1, АЧС-2); 0,2...0,4 % Ni (АЧС-2); 0,03...0,1 % Ti (АЧС-2, АЧС-3). Применяют для изготовления нагруженных деталей узлов трения (крупногабаритных подшипников и их корпусов, шарнирных соединений, втулок и др.). Пары трения чаще всего работают в условиях смазки.

Легированные чугуны.

Различают следующие группы легированных чугунов:

1. По химическому составу: хромистые; алюминиевые; марганцевые никелевые и кремнистые.
2. По количеству легирующих элементов чугуны разделяются на низколегированные (до 3 % легирующих элементов); среднелегированные (от 3 до 10 % легирующего элемента); высоколегированные (свыше 10 %).
3. По условиям эксплуатации: жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, коррозионно-стойкие, немагнитные.

Стали и их применение

Углеродистые конструкционные стали. После закалки и отпуска детали могут работать в условиях трения при высоких статических и вибрационных нагрузках (опоры валов, направляющие, кулачковые механизмы и т. д.). Положительная особенность углеродистых сталей – достаточно высокий комплекс механических свойств при относительно невысокой ударной вязкости. Обладают также хорошими технологическими свойствами (обрабатываемость резанием, свариваемость, штампуемость). Основной недостаток – малая прокаливаемость, поэтому высокие механические свойства после упрочняющей термической обработки получаются только в деталях малых сечений в относительно неглубоком поверхностном слое крупногабаритных деталей.

Легированные стали. В термически обработанном состоянии эти стали имеют высокий предел текучести и твердость, что обеспечивает их высокую износостойкость в широком диапазоне эксплуатации. Упрочнение от действия дисперсных частиц упрочняющей фазы достигается за счет подбора состава стали и оптимальной термической или химико-термической обработки. Упрочняющими фазами в легированных сталях могут быть карбиды разного состава: нитриды, карбонитриды, интерметаллиды, чистые и малорастворимые металлы в железе (например, чистая медь). Требуемые свойства обеспечиваются соответствующим подбором легирующих элементов и режимов термической обработки (закалка и высокий отпуск, закалка и низкий отпуск), позволяющих получить структуру с высокими механическими и триботехнологическими характеристиками.

Инструментальные стали – углеродистые и легированные стали, которые в результате термической обработки приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость, необходимые для обработки материалов резанием или давлением. В зависимости от назначения подразделяют на след. виды: стали для режущих инструментов, штамповые стали для холодного деформирования, штамповые стали для горячего деформирования, стали инструментов высокой прочности. Применяются также для изготовления подшипников, различных пружин, деталей топливных насосов высокого давления, качающих и распределительных устройств, гидравлических насосов, деталей станков и машин (шестеренок, ходовых винтов, червяков и т.п.) и др.

Антифрикционные материалы (от греч. *anti* – против и лат. *frictio* – трение) – материалы для деталей, работающих в условиях трения скольжения (подшипники, втулки, направляющие, вкладыши). Должны обладать: низким коэффициентом трения, хорошей прирабатываемостью, износостойкостью, теплопроводностью, малой склонностью к заеданию (схватыванию) и стабильностью свойств. Антифрикционность материалов проявляется в условиях несовершенной смазки (или при трении без смазки). Различают след. основные группы антифрикционных материалов: сплавы на основе олова, свинца (баббиты), меди (бронзы), железа (серый чугун), цинка или алюминия; спеченные (бронзографит, железографит); пластмассы (текстолит, фторопласт и др.); сложные композиции типа металл-пластмасса (пористая бронза, поры которой заполнены фторопластом).

Подшипниковые (антифрикционные) сплавы – материалы, применяемые для изготовления вкладышей подшипников скольжения. Металл вкладыша

должен обладать следующими свойствами: иметь структуру, улучшающую подвод масла к вращающемуся валу; иметь низкий коэффициент трения, высокую износостойкость поверхности; хорошую теплопроводность и устойчивость к коррозии, выдерживать высокие удельные давления.

В зависимости от нагрузки и скорости вращения вала применяют подшипниковые сплавы на основе железа (серый и ковкий антифрикционный чугун); сплавы на медной основе (бронзы); белые антифрикционные сплавы (баббиты), композиционные материалы и др.

Самосмазывание – способность узла трения или отдельной трибоповерхности выделять в процессе трения смазочный материал за счет содержания в своем составе или конструкции антифрикционных наполнителей любого вида. К таким материалам относится, например, серый чугун (содержащиеся в его составе графитовые включения выполняют роль твердой смазки), фторопласт с добавкой дисульфида молибдена, графитонаполненный капролон и мн. др. Отдельную группу самосмазывающихся узлов трения составляют опоры с подшипниками из пористого спеченного материала, пропитанные маслом. Количество масла в порах этих подшипников, как правило, не пополняется за весь период эксплуатации.

Наполнители – вещества, которые вводятся в состав композиционного материала для придания требуемых свойств. Бывают двух видов: активные, которые вводятся для улучшения каких-либо свойств материала, и инертные, не изменяющие свойств. Чаще всего в качестве наполнителей используют порошкообразные или волокновые композиционные материалы (т. н. армирующие). Наполнители применяют при создании материалов трения. Например, в составе антифрикционных материалов в качестве наполнителей применяют твердые смазочные материалы (см. *Самосмазывание*).

Антифрикционные сплавы цветных металлов

Классификация наиболее распространенных антифрикционных цветных сплавов приведена на рис. 2.23.

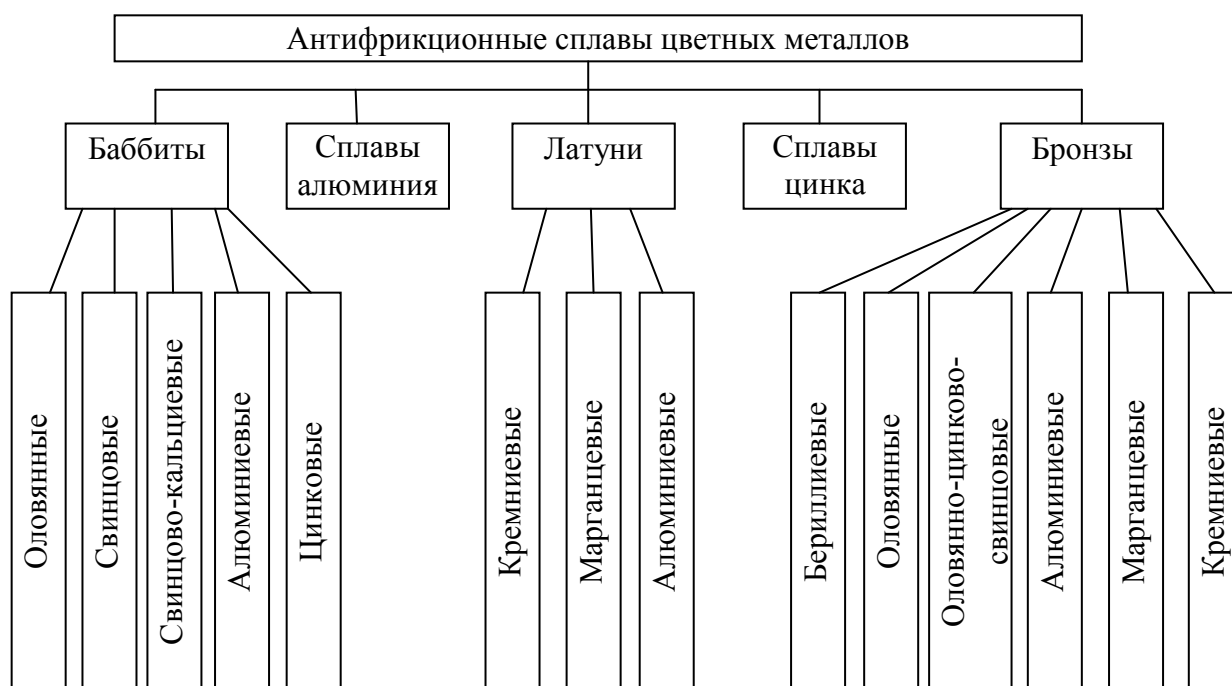


Рис. 2.23. Классификация цветных антифрикционных сплавов

Сплавы на медной основе

Латуни – это сплавы меди с цинком (Zn до 50 %). Латуни классифицируют: по числу компонентов в сплаве: двойные (Cu+Zn) и многокомпонентные (легированные двойные, называемые специальными), а также по техническому признаку: деформированные (изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку др.) и литейные. Латуни используют в качестве заменителей бронз для опор трения. Хорошо свариваются, легко обрабатываются режущим инструментом. Антифрикционные свойства ниже, чем у бронз, поэтому латуни применяют для опор скольжения, работающих с малыми скоростями: подшипников, несущих большую спокойную или ударную нагрузку при малой скорости скольжения (подшипники кранов, вибрационных машин, конвейеров, экскаваторов и др.), для подшипников, работающих в тяжелых условиях с ударными нагрузками; при изготовлении подшипников, втулок, вкладышей (несложной формы), а также для армирования вагонных подшипников. Из латуни изготавливают детали самолетов и морских судов и вкладыши подшипников.

Бронзы – двойные и многокомпонентные медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются различные металлы, кроме цинка. Различают оловянные бронзы, в которых преобладающим легирующим элементом является олово, и безоловянные: алюминиевые, бериллиевые, марганцевые, кремнистые и др. Особую группу образуют низколегированные бронзы высокой тепло- и электропроводности: хромовые, циркониевые и др.

Бронзы по сравнению с латунями обладают более высокой прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Они достаточно коррозионно-стойки в морской воде, в растворах большинства органических кислот, углекислых растворах.

Оловянные бронзы – сплав меди с оловом (медь преобладает), с трудом поддается обработке давлением, резанию и заточке. Обладает очень малой усадкой при литье – 1 % (у латуней и чугуна – около 1,5 %, стали – более 2 %). Обладают высокой антикоррозионной стойкостью и хорошими антифрикционными свойствами. Могут быть дополнительно легированы цинком (до 10 %), никелем, фосфором, свинцом, мышьяком и др. металлами. Бронза с добавлением цинка называется «адмиралтейской» и обладает повышенной коррозионной стойкостью в морской воде. Свинец и фосфор улучшают антифрикционные свойства бронзы и ее обрабатываемость резанием и давлением.

Алюминиевые бронзы – это сплавы на основе меди, легированные алюминием. Отличаются высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами; во многих случаях являются полными заменителями дефицитных оловянных бронз и других сплавов. Содержат до 12 % алюминия, их плотность значительно ниже плотности чистой меди, что имеет большое промышленное значение, особенно в авиакосмической технике и судостроении. Детали изготавливают литьем, обработкой давлением и резанием. Это, как правило, относительно мелкие, но высокоответственные детали типа зубчатых колес, втулок, подпятников, фланцев.

Бериллиевые бронзы – это сплавы меди с бериллием. Имеют высокую прочность, предел упругости и релаксационную стойкость, электро- и теплопроводность, высокое сопротивление коррозии и коррозионной усталости. Не магнитны, не дают искру при ударе; хорошо штампуются, свариваются и т.д. Мало склонны к хладноломкости и могут работать в интервале температур от –200 до +250 °С; используются для изготовления плоских и витых пружин, упругих элементов в виде гофрированных мембран, токоподводящих упругих деталей электрооборудования, пружинящих деталей электронных приборов и устройств и т.д. К недостаткам этих сплавов относят высокую стоимость и дефицитность бериллия, а также его токсичность.

Марганцевые бронзы – содержат до 20 % марганца, хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии, имеет высокую коррозионную стойкость и сохраняет высокие механические свойства при повышенных температурах.

Кремнистые бронзы – отличаются высокими пружинящими и антифрикционными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью, технологичны в обработке давлением в горячем и холодном состоянии, хорошо свариваются с бронзой и сталью, легко паяются мягкими и твердыми припоями. Применяются в приборостроении, химическом и общем машиностроении, морском судостроении для изготовления пружин и пружинящих деталей, антифрикционных деталей и т.д.

Алюминиевые подшипниковые сплавы – класс антифрикционных материалов на алюминиевой основе с легирующими элементами (Sn, Cu, Ni, Si, Pb, Cd, графит и др.). Характеризуются следующими свойствами: высокая теплопроводность; относительно высокая прочность; широкий диапазон возможного легирования; низкая плотность и высокая коррозионная стойкость. Хорошая технологичность позволяет изготавливать подшипники методами литья, прессования, прокатки и др. Изготавливают как монометаллические детали (втулки, шарниры и др.), так и биметаллические подшипники на стальной подложке. Сплавы с высоким содержанием олова по своим свойствам близки к баббитам.

Цинковые антифрикционные сплавы имеют низкую температуру плавления (около 400 °C), хорошо прирабатываются. Технологичны при изготовлении монометаллических и биметаллических деталей; имеют высокую пластичность и сопротивление усталости. Из цинковых сплавов изготавливают цельные и штампованные из ленты втулки, которые применяют, например, в железнодорожных и других транспортных машинах.

Легкоплавкие подшипниковые сплавы (баббиты) – мягкие антифрикционные сплавы на оловянной, свинцовой, алюминиевой и цинковой основах, в которых равномерно распределены твердые кристаллы (кристаллы фазы SnSb или кристаллы Sb, игловидные кристаллы Cu). Низкая твердость 13...23 HB (130...230 МПа), невысокая температура плавления (340...500 °C). Хорошо прирабатываются; имеют низкий коэффициент трения со сталью; хорошо удерживают граничную масляную пленку. Мягкая и пластичная основа баббита при трении в подшипнике изнашивается быстрее, чем вкрапленные в нее твердые кристаллы других фаз, в результате шейка вала при вращении скользит по этим твердым кристаллам. При этом уменьшается площадь фактического касания трущихся поверхностей, что в свою очередь, снижает коэффициент трения и облегчает поступление смазки в зону трения, предотвращает схватывание и задиры. Антифрикционные свойства зависят от толщины баббитового слоя. Баб-

биты применяют для заливки подшипников скольжения при удельных нагрузках не более 10...15 МПа и температуре не выше 100...120 °С.

Спеченные антифрикционные материалы – спеченные сплавы на основе железа, никеля, алюминия, меди и др. элементов, полученные методами порошковой металлургии. Технологический процесс состоит из след. операций: смешивание порошков, например, железа и графита, прессование заготовки, спекание, пропитка маслом, калибровка или механическая обработка рабочих поверхностей с целью получения окончательных размеров и заданной шероховатости поверхности [46].

Композиционные материалы – материалы, образованные объемным сочетанием химически разнородных компонентов с четкой границей раздела между ними. Характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из компонентов, взятый в отдельности. Композиционный материал состоит из фазы I (матрицы) – основной структурной или фазовой составляющей материала, являющейся непрерывной связующей компонентов; из фазы II – одного или нескольких диспергированных в матрице веществ в любом агрегатном состоянии. Фаза II может быть представлена дисперсным (прерывистым) и непрерывным веществом (волоком). Иногда выделяют и фазу III – третий компонент конструкционных материалов – межфазовая граница, обладающая определенным комплексным свойством: избыточной поверхностной энергией, способностью к протеканию процессов диффузии, растворению, перемешиванию микрочастиц, образованию новых фаз.

Пористые композитные материалы получают методом прессования с последующим спеканием из порошков на железной и медной основах. Свойства определяются формой, состоянием поверхности и распределением частиц исходного порошка по размерам в объеме. В качестве обязательных добавок в шихту (основу для спекания) добавляют антизадирные, антифрикционные наполнители – порошки самосмазывающих слоистых материалов: графита, дисульфида молибдена MoS_2 , нитрида бора (BN) и др. Обычно перед использованием в узлах трения пропитывают жидким смазочным материалом. Детали из таких материалов применяют в парах трения при недостаточной смазке или при недопустимости применения других систем смазывания. В процессе работы с повышением температуры автоматически выделяется масло (объем пор 1,5...30 % от объема детали) и поступает в зону фактического контакта. Материалы устойчиво работают как в условиях масляного голодания, так и в условиях обильной смазки.

Пористые оловянные бронзы. Прочностные свойства зависят от содержания олова. Пористость обычно составляет 15...35 %. Используют для замены литых бронз, что дает существенную экономию цветных металлов. Применяют для подшипников машин пищевой и текстильной промышленности, бытовых машин, часовых механизмов, точного инструмента, вентиляторов и т. п., работающих в легких условиях: скорость скольжения до 1,5 м/с, контактные давления – 0,5...1,5 МПа. Такие подшипники не требуют дополнительной смазки в течение 3000...5000 ч, имеют низкий (стабильный) коэффициент трения 0,01...0,04 (при самосмазывании), работают надежно в диапазоне температур от –60 до +120 °С при низком уровне шума.

Бронзографитовые материалы. Механические свойства бронзографитовых материалов зависят от содержания графита. Рабочая температура до 90 °С. Применяют для изготовления подшипников скольжения тракторов, малогабаритных редукторов, текстильного оборудования, электрических машин, радиоэлектронной техники. Они могут применяться в качестве заменителей оловянных литых бронз и латуней. В некоторых случаях могут заменять подшипники качения; могут работать в паре с контртелом, имеющим грубую обработку поверхности трения; в жидкостях, не обладающих смазочной способностью; в циркуляционных насосах; в водомасляных смесях.

Композиционные материалы на основе железа – наиболее распространенные среди антифрикционных спеченных материалов. Введение легирующих элементов и присадок позволяет в широком диапазоне изменять триботехнологические свойства, что позволяет заменять подшипниковые материалы типа баббитов, бронз (как литых, так и спеченных), при этом композиты на основе железа обладают более высокой износостойкостью, чем бронза, и превосходят ее по максимально допускаемым контактным давлениям. Для повышения прочностных и антифрикционных свойств подвергают химико-термической обработке (сульфидированию, хромированию, азотированию). Используют для изготовления самосмазывающихся подшипников (пропитка пор маслом) кольцепрядильных машин, бытовой аппаратуры и различных приборов.

Железографит. Трибомеханические свойства зависят от его пористости и содержания графита. Для тяжелых условий работы в подшипниках используют пористые вкладыши из железографита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить подшипники качения. Имеет свойства самосмазывания.

Металлофторопластовые материалы – композиционные материалы, состоящие из стальной подложки и пористой бронзовой матрицы, пропитанной и покрытой смесью политетрафторэтилена (ПТФЭ) со свинцом (рис. 2.24). Стальная подложка обеспечивает механическую прочность, а бронзовый промежуточный слой – прочное соединение с подложкой. Иногда в состав материала вводят спец. наполнители (графит, дисульфид молибдена и др.), чтобы улучшить его антифрикционные свойства. Могут работать при сухом трении, трении в вакууме, при скоростях скольжений 1...6 м/с, нагрузках до 6 МПа, в широком диапазоне температур (от –200 до +280 °С) и в некоторых агрессивных средах. Применяются при изготовлении подшипников. Пример «интеллектуального» материала.

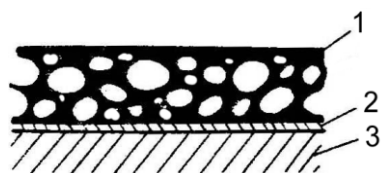


Рис. 2.24. Структура многофункционального рабочего слоя:
1 – пористая бронза, пропитанная фторопластом; 2 – бронзовая подложка;
3 – стальная основа

Твердые сплавы используют в качестве конструкционного материала трущихся деталей узлов трения и режущего инструмента. Они состоят из твердых карбидов и связующей фазы, изготавливаются методами порошковой металлургии. Твердость (88...93 HRC) и высокая прочность ($\sigma_b > 2500$ МПа) зависят от состава твердых сплавов (от количества связующей фазы и величины зерен карбидов). Отличаются очень высокой износо- и теплостойкостью. В машиностроении используют для изготовления режущего инструмента: износостойкость инструментов из твердых сплавов в 10...20 раз выше износостойкости инструментов из быстрорежущих инструментальных сталей.

Сверхтвердые материалы (СТМ) – материалы, микротвердость которых находится на уровне 30...40 ГПа и выше. К ним относятся алмаз, кубический и вюрцитный нитрид бора, композиты на их основе. СТМ присущи высокая износостойкость, теплопроводность, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения и другие важные физико-механические характеристики, что делает СТМ перспективными инструментальными и конструкционными материалами.

Полимерные материалы. Применяются в трибологии благодаря некоторым характерным свойствам: инертность ко многим реактивам; относительно низкая склонность к схватыванию; самосмазывающие свойства; низкий модуль упругости. Могут использоваться в качестве антифрикционных материалов, как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов с различными на-

полнителями. Из полимерных материалов изготавливают: зубчатые колеса, шкивы, детали подшипников, кулачковые механизмы, направляющие, уплотнения, сепараторы подшипников качения, шарниры и т.д.

Эластомеры – полимерные материалы (натуральный и синтетические каучуки, резина и др.), обладающие высокоэластичными свойствами в широком интервале температур, охватывающем практически всю область температур их эксплуатации.

Углеграфитовые материалы – искусственные материалы на основе природного или синтетического графита, каменноугольной или искусственных смол, легкоплавких сплавов, полученные специальной обработкой, иногда с добавлением цементирующих веществ. Характеризуются высокой жаростойкостью (до 3700 °С при давлении до 20 ГПа), высокой прочностью при повышенных температурах, окислительной стойкостью на воздухе, в паро-воздушной и агрессивных средах. Применяются для изготовления различных деталей трения (подшипники скольжения, поршневые кольца, направляющие, втулки, уплотнения и др.). Могут работать без смазки при температурах до 2000 °С, в агрессивных средах [46].

Материалы на основе фторопласта. Фторопласт отличается самым низким и стабильным коэффициентом трения по стали (0,04) и лучшими смазывающими свойствами среди полимеров. Вследствие низкой твердости для изготовления деталей трибосопряжений чистый фторопласт не применяют, а используют композиционные материалы на основе фторопласта. Например, спеченные пористые подшипники, пропитанные фторопластом, перспективны для не смазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта: коэффициент трения составляет примерно 0,05, температура до 280 °С, в том числе в кислых и щелочных средах.

Материалы на основе полиамидов. Отличаются высокими механическими свойствами, в том числе жесткостью, твердостью, стойкостью к ударным нагрузкам, усталости и радиационной стойкостью. Имеют низкий коэффициент трения и по этому показателю уступают фторопласту и полиформальдегиду, однако по износостойкости и несущей способности превосходят их. Для улучшения прочностных свойств полиамиды армируют, а для увеличения смазочной способности вводят графит, дисульфид молибдена, кокс и др. Улучшение триботехнических характеристик достигается также введением наполнителей в виде волокон, например углеродных, меднографитных взамен графитных порошков.

Материалы на основе полиимидов. Отличаются высокой термической и термоокислительной устойчивостью (на воздухе до 350...450 °С, в вакууме или инертной среде до 500 °С, длительная эксплуатация при 200...260 °С). Радиационностойки, что в сочетании с малой летучестью в вакууме делает их перспективными для применения в узлах трения, работающих в вакууме. Высокое сопротивление ползучести, особенно при высоких температурах. Возможность применения полиимидов для изготовления деталей высокой точности обусловлено их малой усадкой (0,7...1,0 %) при прессовании и спекании, небольшим водопоглощением (0,2...0,3 %). Для улучшения антифрикционных свойств вводятся твердосмазочные наполнители (графит, дисульфид молибдена).

Материалы на основе поликарбоната. Композиционные материалы на основе поликарбоната обладают высокой механической прочностью и ударной вязкостью; стабильностью свойств и размеров в широком интервале температур; стойкостью к атмосферным воздействиям; устойчивы к ультрафиолетовым лучам и резким перепадам температур. Применяют для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температуре –50°...+110 °С. Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в поликарбонат вводят специальные наполнители и твердые смазки. Введение дисульфида молибдена, графита или 15...20 % фторопласта снижают коэффициент трения в 2...3 раза.

Материалы на основе полиарилатов. Применяются для изготовления деталей подшипников скольжения и качения для работы в глубоком вакууме без смазки. Полиарилаты в чистом виде имеют высокий коэффициент трения (0,35...0,40) и относительно невысокую износостойкость. В целях улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь, серебро.

Материалы на основе эпоксидных смол. Наряду с традиционными наполнителями (графит, дисульфид молибдена, оксиды металлов, кокс, различные волокнистые материалы и т.д.) в эпоксидные смолы вводят фурановые олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость композиционных материалов. Изготавливают лопатки воздушных ротационных насосов, поршневые кольца компрессоров, работающие без смазки; торцовые уплотнения; подшипники скольжения для узлов сухого трения, работающие в условиях нормальной влажности при повышенных температурах. Повышение температуры эксплуатации от 50°

до 250 °С вызывает снижение коэффициента трения композиционных материалов в 1,5...2 раза, при дальнейшем повышении температуры до 300 °С коэффициент трения практически не изменяется или возрастает незначительно.

Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров. Широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов ввиду их повышенной термической и химической стойкости, износостойкости. Изготавливают подшипники скольжения, уплотнения, направляющие, работающие при повышенных температурах. Для улучшения триботехнологических свойств вводят наполнители (графит, свинец, дисульфид молибдена, оксиды алюминия и меди, кремний, порошки алюминия, железа и меди, а также, углерод, асбест, базальтовые, стеклянные, углеродные и другие волокна), что позволяет получать самосмазывающиеся материалы с низкими коэффициентами трения (0,04...0,06) и интенсивностью изнашивания (10^{-9} ... 10^{-11}).

Фрикционные материалы

Фрикционные материалы – конструкционные материалы трения, предназначенные для работы в узлах, передающих или рассеивающих кинетическую энергию (тормоза, фрикционные муфты, сцепления, демпферы и др.). Ф. м. должны обладать высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным колебаниям, воздействию абразива и агрессивных сред, фрикционной теплостойкостью и фрикционной термоусталостью (усталость материала, при которой накопление необратимых изменений, приводящих к возникновению на поверхности трения трещин, происходит под воздействием многократного (циклического) совместного теплового и силового нагружений). В качестве таких материалов применяется графитизированная сталь, легированные чугуны с мелкими равномерно распределенными включениями графита, спеченные фрикционные материалы.

Триботехнологические материалы с особыми свойствами

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) – класс технических неорганических материалов, образующихся в результате тонкой кристаллизации стекол или расплавов различных составов в объеме заранее отформованного изделия с введением различных функциональных добавок. От стекла отличаются кристаллическим строением, а от керамики – меньшим размером кристаллов. Обладают высокой твердостью, равной закаленной инструментальной стали 640 HV (~ 6400 МПа). Прочность ситаллов (особенно при сжатии) выше,

чем большинства керамических материалов и металлов ($\sigma_{\text{изг}} = 250 \dots 500$ МПа, $E = (0,85 \dots 1,4) \cdot 10^5$ МПа). Имеют хорошие электроизоляционные свойства, способны выдерживать резкое охлаждение от 900°C ; кислото- и щелочеустойчивы. По химическому составу их подразделяют на группы: сподуменовые; кордиеритовые; борнобариевые и борно-свинцовые, высококремистые; фотоситаллы, шлакоситаллы, ситаллоэмали и др. Изготавливают плунжерные пары, детали трения насосов для химического машиностроения, футеровку мельниц, фильеры для синтетических волокон, точные калибры, нитепроводящие детали текстильных машин и другие детали, подверженные интенсивному абразивному изнашиванию. Иногда ситаллы используют в качестве наполнителей металло-стеклянных износостойких материалов. Ситаллоэмали применяют в качестве антикоррозионных, термостойких (до 840°C) и износостойких покрытий.

Керамические материалы – неорганические неметаллические материалы на основе оксидов, карбидов, боридов, нитридов и силицидов тугоплавких металлов; алюминия, титана, циркония и др. Существуют также композиционные материалы, представляющие собой включения в металлической матрице керамики (металлокерамика и керметы).

Минералокерамика. Получают из порошков, главным образом оксидов, характеризующихся высокой прочностью, жаропрочностью, износостойкостью и состоящие из кристаллитов, соединенных аморфной стекловидной фазой. Применяют для изготовления сменных пластин режущих инструментов для получистовой или чистовой обработки углеродистых и легированных сталей и чугуна. Эти пластины обладают высокой теплостойкостью ($1200 \dots 1400^\circ\text{C}$), твердостью $3000 \dots 3300$ HV ($30 \dots 33$ ГПа), износостойкостью и химической устойчивостью. Корундовую минералокерамику применяют также для изготовления износостойких насадок гидромониторных долот, горловин насосов, нитепроводителей ткацких станков. Используют в электротехнике для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопов.

Металлорезина – цельнометаллический пористый аналог резины, получаемый холодным прессованием заготовок, сформированных из растянутой проволоочной спирали. Детали из металлорезины после прессования не требуют дополнительной механической обработки. Изделия из металлорезины обладают упругими свойствами, подобными свойствам как резины, так и пластмассы, но имеют в 10 раз большую прочность, не подвержены старению, в 2...3 раза лучше поглощают ударные и вибрационные нагрузки, могут работать в агрессивных средах, не подвержены воздействию масел, грязи, пыли, выдерживают

температуру от -50 до $+400$ °С, не боятся радиации и не воспламеняются. Применяется в авиации и космической технике, в химической промышленности. Используется для изготовления амортизаторов, компенсаторов, рабочих элементов упругих муфт и упругих зубчатых колес, цельнометаллических упругих уплотнений, мощных малогабаритных пружин, восстанавливаемых фильтрующих элементов, гидравлических демпферов дроссельного типа, уплотнений, для армировки подшипников скольжения, виброгасителей, различных виброизоляторов и др. изделий, предназначенных для защиты и в качестве звукопоглощающего материала.

Сплавы с памятью формы – класс металлических материалов, обладающие обратимостью неупругой деформации. Явление самопроизвольного восстановления формы – эффект памяти формы (ЭПФ) – может наблюдаться как в изотермических условиях, так и при температурных изменениях. При теплосменах такие металлические материалы могут многократно обратимо деформироваться. Способность к восстановлению деформации не может быть подавлена даже при высоком силовом воздействии. Уровень реактивных напряжений некоторых материалов с ЭПФ может составлять до 1000...1300 МПа. Сплавы с памятью формы выполняют три вида функций: а) проявление эффекта памяти формы при снятии напряжения при нагреве, даже в случае наличия пластической деформации; б) сверхупругий (или псевдо-упругий) эффект с высоким восстановлением упругости; в) высокое демпфирование вибраций. Используются в авиакосмической и авиационной технике, автомобильной промышленности (системы кондиционирования воздуха, автоматические выключатели, крепежные детали разных типов, регулирующие клапаны, микродвигатели для роботов), а также в электронной промышленности, медицинской технике и т. д.

Принципы выбора и назначения материалов. Принцип Шарпи

Шарпи принцип – принцип распределения структурных фаз сплава, обеспечивающий его высокие антифрикционные и износостойкие свойства, прочность, вязкость и др. В соответствии с принципом Шарпи твердые структурные составляющие с низким коэффициентом трения и малой склонностью к задирам должны залегать в вязкой сплошной матрице в виде изолированных друг от друга включений. В свое время все создаваемые подшипниковые сплавы удовлетворяли этому правилу (баббиты, оловянистые бронзы). В последующем были

разработаны сплавы с мягкими включениями в твердой матрице, например, свинцовистая бронза, однородные антифрикционные материалы и др.

Некоторые правила выбора материалов для пар трения

1. Сочетать твердый материал с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения при работе. При таком сочетании материалы хорошо противостоят заеданию (например, хром – резина при смазывании минеральным маслом и водой и хром – бронза при использовании пластичных смазочных материалов).

2. Сочетать твердый металл с твердым (сочетание пар из азотированной, хромированной и закаленных сталей). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей. Нанесение приработочных покрытий повышает надежность пар в наиболее опасный период работы – во время приработки. Применение этих пар ограничивается скоростями скольжения. Высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкции, тщательная приработка, улучшение условий смазывания значительно расширяют область применения пар трения из твердых материалов.

3. Избегать сочетаний мягкого материала с мягким, а также пар из одноименных материалов (незакаленная сталь по незакаленной стали, алюминиевый сплав по алюминиевому, медный сплав по алюминиевому, хром по хрому, никель по никелю, пластмасса по пластмассе), за исключением пар из политетрафторэтилена и полиэтилена. При незначительных перегрузках в парах образуются очаги схватывания и происходит глубинное вырывание материалов с взаимным их налипанием на поверхности трения.

4. Применять в труднодоступных для смазывания конструкциях пористые, порошковые материалы и антифрикционные сплавы.

5. Применять в качестве фрикционных и антифрикционных материалов пластические массы. В ряде случаев они повышают надежность и срок службы узла трения, снижают массу конструкции и расход дефицитных цветных металлов, уменьшают вибрации и улучшают акустические свойства машин.

6. Стремиться путем выбора материалов пары трения, смазочных материалов и присадок к ним создавать условия реализации режима избирательного переноса в паре трения.

7. Применять материалы, трудно поддающиеся наводораживанию.

8. Стальные детали узлов трения при окончательной доводке их поверхности подвергать финишной антифрикционной обработке (методы ФАБО, КАУО).

3.2. Смазывание и смазочные материалы

3.2.1. Функции смазки. Общие механизмы смазочного действия

Классификация смазочных материалов.

По физическому состоянию:

- а) жидкие,
- б) пластические (мази),
- в) твердые
- г) газовые.

По типу разделения поверхностей трения смазочным материалом:

- а) гидродинамическое (газодинамическое) – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется вследствие давления, возникающего в слое жидкости (газа) при относительном перемещении поверхностей;
- б) гидростатическое (газостатическое), при котором полное разделение поверхностей трения, находящихся в относительном движении или покое, обеспечивается вследствие наличия в зазоре между ними жидкости (газа) под внешним давлением;
- в) граничная смазка, при которой между подвижными поверхностями находится тонкий слой масла со свойствами, отличающимися от объемных;
- г) полужидкостная смазка, при которой частично реализуется жидкостная смазка, а частично – граничная.

Эффективность смазочного материала в трибосистеме зависит от следующих факторов:

- условий его эксплуатации (температуры, давления на контакте, скорости движения, параметров среды и т.д.);
- условий эксплуатации машины или смазываемого узла (постоянства или изменчивости внешних силовых факторов, частоты пусков и остановок машины и т.д.);
- конструктивных особенностей трибосистемы (типа, размеров, характера взаимного движения элементов и т.д.);

- состава и свойств материалов, с которыми контактирует смазочный материал во время эксплуатации.

Смазочный материал как элемент трибосистемы выполняет следующие функции:

- снижает силы трения, возникающие в области контакта ее элементов;
- уменьшает износ и предотвращает схватывание подвижных контактирующих поверхностей;
- отводит теплоту из зоны трения;
- защищает поверхности трения элементов системы и прочие неизолированные поверхности от коррозионного влияния внешней среды;
- уплотняет зазоры между сопряженными элементами трибосистем;
- удаляет из области контакта продукты износа, коррозии и различного вида загрязнения или абразивные частицы.

3.2.2. Классификация смазочных систем

Все смазочные системы классифицируют:

- по виду смазочного материала;
- по числу смазываемых пар трения; по способу подключения к точке смазки;
- по способу использования смазочного материала;
- по способу дозирования;
- по режиму подачи;
- по типу привода;
- по способу управления.

По виду смазочного материала различают смазочные системы с жидким (жидкостные смазочные системы) и пластичным смазочным материалом (пластично-смазочные системы). В свою очередь в составе жидкостных смазочных систем выделяют масляно-воздушные системы, в которых смазочный материал транспортируется к парам трения сжатым воздухом.

По числу смазываемых пар трения, обеспечиваемых смазочным материалом от одного смазочного нагнетателя, различают индивидуальные смазочные системы, предназначенные для смазывания одной пары трения и централизованные, обслуживающие несколько пар трения.

По способу подключения к точке смазки различают отдельные смазочные системы, в которых смазочный насос или заливная масленка присоединяются к одной или нескольким парам трения только на время подачи смазочного мате-

риала, и нераздельные смазочные системы, в которых смазочный нагнетатель или наливная масленка присоединены к точке смазки постоянно.

По способу использования смазочного материала смазочные системы подразделяют на циркуляционные и проточные.

В *циркуляционных системах* масло поступает к узлу трения, смазывает его, отводит от него теплоту и возвращается в резервуар, где охлаждается, очищается, после чего вновь подается к узлу трения. К *проточным смазочным системам* относятся системы с однократным использованием смазочного материала. Так в пластично-смазочных системах консистентная смазка, пройдя через зазор между трущимися поверхностями, в большинстве случаев утрачивает свои смазочные свойства, и постепенно выдавливаясь наружу, теряется безвозвратно.

По способу дозирования различают смазочные системы объемного и дроссельного дозирования.

По режиму подачи различают смазочные системы непрерывного и периодического действия. Для первых характерна непрерывная подача смазочного материала к парам трения в течение всего времени работы смазываемого объекта, а в смазочных системах периодического действия – периодическая.

По типу привода смазочного нагнетателя выделяют смазочные системы с ручным, механическим, электрическим, гидравлическим и пневматическим приводом.

По способу управления циклом смазки различают смазочные системы: с ручным управлением, когда заданные параметры режима смазывания обеспечиваются оператором, полуавтоматическим управлением, когда смазочная система приводится в действие вручную, а затем работает без участия оператора до завершения рабочего цикла; автоматическим управлением, обеспечивающим заданные режимы смазывания без участия оператора.

Закладная смазка – способ смазывания, применяемый для редко используемых узлов трения, когда смазочный материал закладывается в узел при его сборке и обновляется при плановом или предупредительном ремонте

Картерная смазка осуществляется окутанием узлов трения в процессе работы механизма в масляную ванну и разбрызгиванием смазочного материала в замкнутом пространстве, в котором размещены смазываемые детали.

В зависимости от способа подачи масла к поверхностям трения различают смазывание индивидуальное (капельное и фитильное), погружением, кольцом и под давлением.

Индивидуальный метод смазывания осуществляется различными масленками. Функционирование такой системы зависит от субъективных данных обслуживающего персонала, который должен непрерывно следить за уровнем масла.

Смазывание погружением – в зону контакта масло подается колесом или паразитной шестерней за счет сил молекулярного сцепления. Работа системы определяется скоростью колес. При окружной скорости $v > 10$ м/с масло срыгается с поверхности зубьев и не попадает в зону контакта. К другим недостаткам такой смазки относятся накопление в корпусе продуктов износа и дополнительный расход энергии на перемешивание масла.

Смазывание маслоподающим кольцом – кольцо свободно расположено на втулке вала и погружено в масло, находящееся в нижней половине корпуса. Вращаясь вместе с валом, кольцо переносит масло из нижней части корпуса в маслосборник, откуда оно, пройдя через подшипник, стекает обратно в нижний коллектор. Существенный недостаток этой системы заключается в том, что она не функционирует при пуске и остановках машин.

Смазывание под давлением применяют в ответственных механизмах, когда теплота не может быть полностью отведена в окружающее пространство. Од-

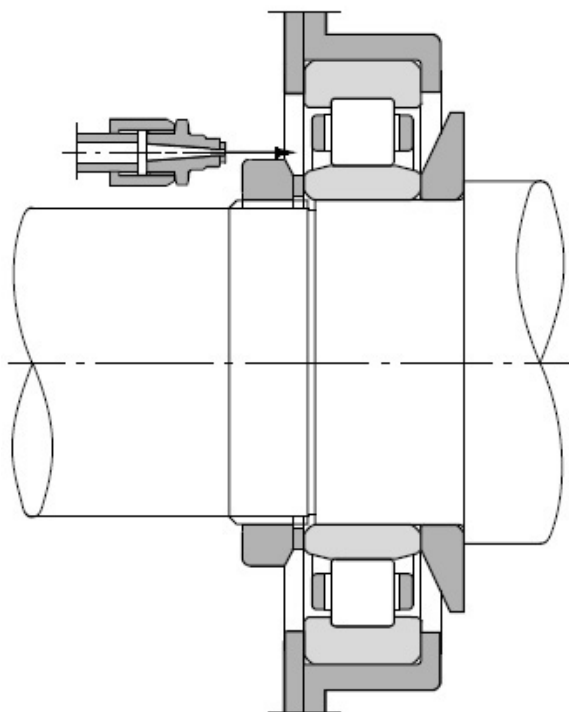


Рис. 2.25. Смазывание под давлением

ним из наиболее эффективных методов достижения такого режима является струйная смазка (рис. 2.25), при которой струя масла под давлением (5...10 атм.) направляется на рабочую поверхность внутреннего кольца подшипника с таким расчетом, чтобы вращением тел качения масло отбрасывалось к периферии подшипника и удалялось через вырезы на наружной поверхности сепаратора либо через пазы в наружном кольце подшипника. Скорость струи масла должна быть достаточно высокой (не менее 15 м/с) для преодоления завихрений, возникающих вокруг вращающегося подшипника.

Смазывание масляным туманом (рис. 2.26) может применяться как для подшипниковых узлов, работающих при высокой частоте вращения (шлифо-

вальные шпиндели и др.), так и для тяжелонагруженных узлов (подшипниковые опоры листопркатных станов). Преимущество заключается в минимальном расходе масла при интенсивном воздушном охлаждении. Кроме того, избыточное давление воздуха внутри подшипникового узла защищает опору от внешних загрязнений. Основные недостатки – высокая стоимость оборудования (наличие систем получения сжатого воздуха, очистки его от пыли и воды, установка для преобразования масляного тумана и др.); загрязнением окружающей среды мельчайшими частицами масляной пыли.

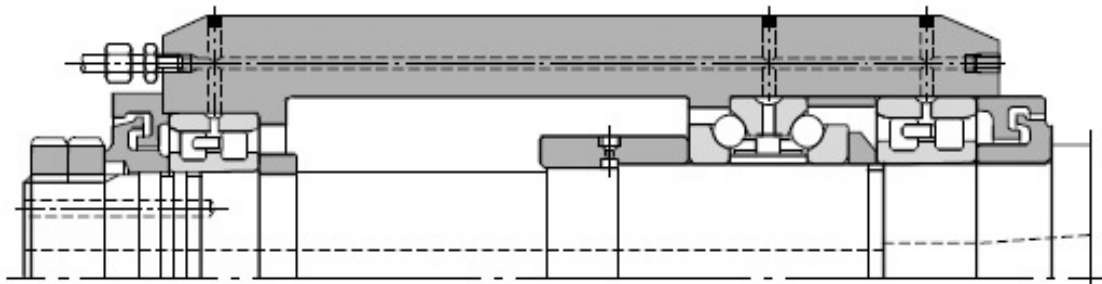


Рис. 2.26. Смазывание масляным туманом

Масловоздушные масляные системы (рис. 2.27) – масло подается периодически дозирующим устройством в подающий канал трубопровода. Прижимаясь к стенкам трубопровода под воздействием сжатого воздуха, масло «сползает» по ним и поступает в подшипник.

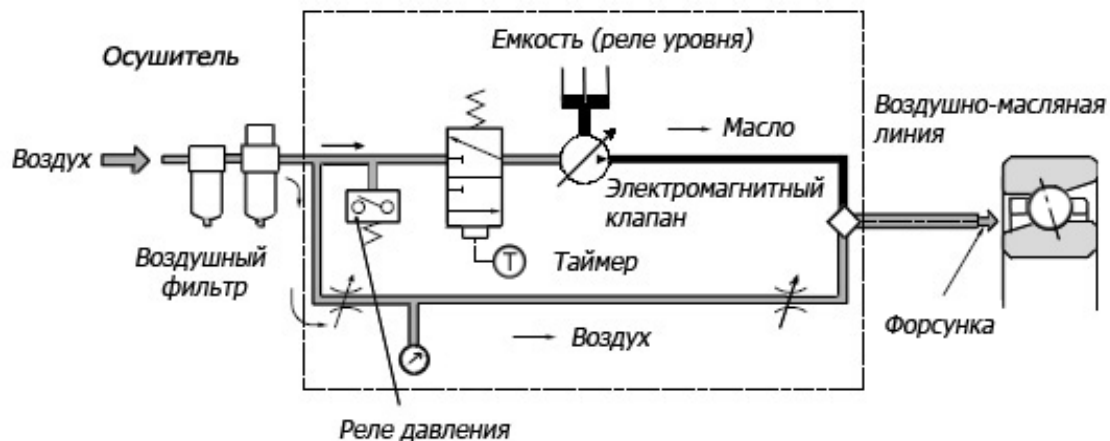


Рис. 2.27. Система смазки масло-воздух

Сжатый воздух также используется для охлаждения подшипника и создания избытка давления в подшипниковом узле, препятствующего проникновению внутрь загрязняющих веществ. Система имеет важнейшее преимущество по сравнению со смазыванием масляным туманом: очень небольшое и точно дозированное количество масла направляется в каждый отдельный подшипник при помощи сжатого воздуха, что позволяет резко снизить потери масла, в том числе в окружающую среду. Подаваемое такой системой минимальное количе-

ство масла (в десятки раз меньше, чем при смазывании пластичной смазкой) позволяет подшипникам работать при низких температурах и на высоких скоростях, каких не может обеспечить никакой другой способ смазывания.

3.2.3. ПАВ и присадки

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) – химические соединения, которые способны адсорбироваться на поверхности раздела термодинамических фаз и снижать поверхностное натяжение. К ПАВ относятся жирные одноосновные кислоты (пальмитиновая, стеариновая и др.), мыла, спирты.

Эффект ПАВ при контактировании трибоповерхностей объясняется эффектом Ребиндера [5, 52].

Эффект Ребиндера – явление адсорбционного влияния среды на механические свойства и структуру твердых тел. Сущность явления состоит в облегчении деформирования и разрушения твердых тел в результате понижения их свободной поверхностной энергии при контакте со средой, содержащей вещества, способные к адсорбции на межфазной поверхности. Проявляется лишь при совместном действии среды (например, смазочного материала) и механических напряжений. Эффект проявляется в снижении прочности и возникновении хрупкости, уменьшении долговечности, облегчении диспергирования. Например, смоченная ртутью цинковая пластина под нагрузкой не гнется, а хрупко разрушается.

Другая форма проявления эффекта Ребиндера – пластифицирующее действие среды на твердые материалы, например, органических поверхностно-активных веществ (ПАВ) на металлы и др. Термодинамический эффект обусловлен уменьшением работы образования новой поверхности при деформации в результате понижения свободной поверхностной энергии твердого тела.

Снижение поверхностного натяжения металла облегчает пластическое течение в зернах, расположенных в поверхностном слое. Поверхностно-активные молекулы, стремясь покрыть всю поверхность тела в зоне соприкосновения со смазкой, проникают в ультрамикроскопические трещины, мигрируя по их стенкам со скоростями, превосходящими скорость всасывания жидкости в зазор трещины. Когда активные молекулы достигают мест, где зазор равен размеру одной-двух молекул (рис. 2.28), адсорбционный слой своим давлением стремится расклинить трещину. Давление на стенки трещины у ее вершины может достигать до 10 ГПа [52].

Важнейшие области технического приложения эффекта Ребиндера – облегчение и улучшение механической обработки различных (особенно высокотвердых и труднообрабатываемых) материалов, регулирование процессов трения и износа с применением смазок (например, облегчение приработки двигателей, исключение возможных задигов поверхностей при перегрузках пар трения), повышение эффективности диспергирования, помола, обработки материалов резанием и давлением.

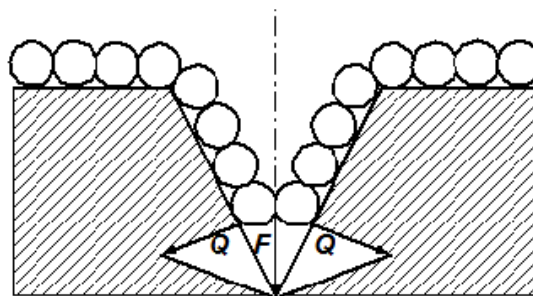


Рис. 2.28. Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала:
 F – давление адсорбированного слоя;
 Q – расклинивающие силы

Присадки – это сложные органические или металлоорганические соединения, которые вводятся в масла для улучшения их эксплуатационных свойств. Применяются в трансмиссионных, гидравлических, промышленных, трансформаторных и других маслах, пластичных смазках, особенно широко – в моторных маслах. Должны хорошо растворяться в смазочных материалах; не выпадать в осадок при колебаниях температуры и в процессе хранения; быть термически и химически стабильными; не изменять других свойств смазочных материалов; иметь стабильные характеристики.

Антиокислительные присадки повышают стабильность масла в двигателях внутреннего сгорания против окисления при высоких температурах. Разделяются на низкотемпературные ингибиторы, замедляющие процесс окисления углеводородов при относительно невысоких температурах (150...200 °С), и термоокислительные, замедляющие процесс окисления масел в тонких слоях при высоких температурах.

Антикоррозионные присадки повышают коррозионную стойкость моторных масел и металлов трибосистем.

Моюще-диспергирующие присадки предназначены в основном для предотвращения отложений на поршнях, поршневых кольцах, стенках и других деталях двигателя, а также для диспергирования продуктов загрязнения, накаплиющихся в моторном масле при работе двигателя.

Антифрикционные присадки уменьшают потери мощности на трение. Особенностью антифрикционных присадок является их эффективное действие в условиях предельной смазки.

Антиизносные присадки содействуют повышению износостойкости поверхностей трения путем образования из поверхностно-активных веществ, входящих в состав присадок, адсорбционных пленок на поверхности металла. К ним принадлежат соединения, содержащие неактивную серу, а также эфиры фосфорной кислоты.

Противозадирные присадки применяются для предотвращения, ограничения и торможения заедания в трибосистемах скольжения при высоких контактных температурах и нагрузках. При использовании продукты их разложения химически взаимодействуют с металлом при высоких температурах трения. В этом случае образуются соединения, имеющие меньшее сопротивление трению и более низкую температуру плавления по сравнению с чистыми металлами, что противодействует заеданию поверхностей трения.

Вязкостные присадки используются для улучшения вязкостнотемпературных свойств масла, при прокачке его при низких температурах. Масла с такими присадками называют загущенными.

Депрессорные присадки сдерживают образование в масле сплошных кристаллических решеток при снижении температуры, благодаря чему оно сохраняет свою текучесть.

Противопенные присадки предотвращают образование пены в масле. Вводятся совместно с моющими, поскольку последние повышают пенообразование в масле.

Многофункциональные присадки применяются для одновременного улучшения нескольких свойств смазочных масел. К многофункциональным присадкам принадлежат алкилфенольные присадки, которые характеризуются антикоррозионными, моющими, антиокислительными свойствами; фенолсульфиды, имеющие антикоррозионные и моющие свойства, а также снижающие температуру застывания масел. Многофункциональные, или так называемые трибополимеризующие присадки, образуют полимерные пленки на поверхностях трибосопряжений.

3.2.4. Механика и физико-химия действия смазки

Действие смазывающего материала заключается в образовании на поверхностях трения адсорбированных или хемосорбированных пленок, в результате чего между поверхностями уменьшаются сила трения и (или) интенсивность изнашивания. Поток смазочного материала отводит тепло трения и поступаю-

щее к поверхностям трения тепло от горячих частей машины, а также выносит из зоны трения продукты износа [16].

Конструкционные смазочные материалы – смазочные материалы, являющиеся конструкционным элементом узла трения, во многом определяющим долговечность, надежность и потери на трение в трибосопряжениях.

Газовые смазочные материалы

К ним принадлежат: воздух, углекислый газ, азот, инертные и другие газы. Они используются в высокооборотных газодинамических (газостатических) подшипниках для создания несущего (поддерживающего) слоя, разделяющего подвижные детали. Углекислый и другие газы применяются в условиях, где существует достаточно активное окисление в воздушной среде элементов трибосистемы. Воздух (газ) также может использоваться для образования масляного тумана (аэрозолей), который подается под давлением в зону трения.

Жидкие смазочные материалы

Физико-химические свойства смазочных масел регламентированы стандартами, показателями качества

- плотность номинальная (при заданной температуре);
- вязкость номинальная (обычно при 50 и 100 °С);
- температура вспышки – наиболее низкая температура вспышки паров нагреваемого смазочного масла при приближении пламени в условиях обычного давления;
- температура застывания – наиболее высокая температура, при которой масло теряет текучесть;
- кислотное число (КОН) – количество миллиграммов едкого калия, которое требуется для нейтрализации;
- коксуемость – отношение (в %) массы кокса к навеске испытуемого смазочного материала;
- зольность – наличие в смазочных маслах несгораемых веществ;
- содержание механических примесей;
- содержание воды;
- содержание водорастворимых кислот и щелочей;
- коррозионное воздействие на Fe, Cu;
- содержание растворителей (фенола, крезоло, нитробензола и фуртуrola, применяемых при селективной очистке смазочных масел).

Консистенция смазки (от позднелат. *consistentia* – состояние) – характеристика, определяющая подвижность вязких жидкостей (масел). Должна оставаться максимально постоянной в широком температурном диапазоне и такой, чтобы при низких температурах масло не теряло своей подвижности. Повышение подвижности масел, особенно специальных «северных» сортов, достигается использованием синтетических продуктов в качестве основы (например масла на основе эфиров, силиконов, силоксанов).

Минеральные (нефтяные) масла – жидкие смеси высококипящих углеводородов, главным образом алкилнафтяновых и алкилароматических, получаемые переработкой нефти.

Синтетические масла – органические смазочные вещества, получаемые в процессе химического синтеза и применяемые в качестве смазочных средств в двигателях, компрессорах, редукторах и прочих механизмах и приборах. Существует несколько разновидностей в зависимости от химического состава (углеводородные, полиорганосилоксановые, галогензамещенные, изопарафиновые, полиалкиленгликолевые, хлорфторсодержащие, эфирные и др.). Характерны малая испаряемость, хорошие низкотемпературные характеристики, пологая вязкостно-температурная кривая, огнестойкость, термическая и термоокислительная стабильность, химическая инертность и стойкость к радиации. Высокая стоимость и особенности эксплуатации ограничивают их широкое применение.

Моторные масла – масла, предназначенные для смазывания карбюраторных, дизельных и авиационных поршневых двигателей, двухтактных бензиновых двигателей с целью уменьшения трения, износа и предотвращения задира трущихся поверхностей, отвода тепла и уплотнения зазоров, в первую очередь, в зоне цилиндра-поршневой группы двигателя. Моторные масла разделяются: по кинематической вязкости при 100 °C на 21 класс ($3,82 < \nu < 22 \text{ мм}^2/\text{с}$); по сезонности применения (летние, зимние, всесезонные); по типу двигателя и степени его форсирования. По базовому составу делятся на две группы: минеральные масла, полученные прямой перегонкой нефти, и синтетические масла, производимые путем химического синтеза.

Трансмиссионные масла предназначены для смазывания механических и гидромеханических передач, используются в коробках передач, рулевых механизмах, в зубчатых и цепных передачах (редукторах) всех видов.. Условия работы – высокие контактные напряжения (до 2000 МПа), скорость скольжения до 3 м/с, температура масла до 80...100 °C.

Индустриальные масла – группа нефтяных масел, предназначенных для смазывания узлов трения металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, насосов, приборов, гидросистем и др. Индустриальные масла используются для уменьшения коэффициента трения, для отвода тепла, защиты деталей от коррозии, очищения поверхностей трения от загрязнения, уплотнения, предотвращения задигов поверхностей трения.

Гидравлические масла (жидкости) используются как рабочая жидкость в гидросистемах различных машин. Для амортизаторов вследствие специфики работы этих устройств используются специальные масла, рабочий диапазон температур которых должен быть достаточно широким ($-60 \dots + 140$ °С).

Турбинные масла предназначены для смазки трибосистем разного вида турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов и т.п.

Компрессорные масла применяются для смазки и герметизации узлов трения различных компрессоров и вакуумных насосов.

Консервационные материалы (масла, растворы с ограниченной растворимостью, дисперсии, аэрозоли, эмульсии) применяются для защиты различных изделий, узлов, аппаратуры, машин, конструкций от атмосферной коррозии и коррозионно-механического износа. В этой группе имеются две разновидности масел: только для консервации и используемые в том числе как ходовые.

Технологические масла используются как рабочая среда в технологических процессах (обработки резанием, пластической обработки, термообработки, производстве бетонных изделий, литейных форм, керамики), а также в пищевой, текстильной, химической (фтор- и хлорфторуглеводородные) и других областях промышленности.

Специальные масла служат для выполнения особых определенных функций (вакуумные, медицинские, для механизмов проекторов, для цепей туннельных печей, герметизации буровых скважин, паяльные, парфюмерные и др.).

Пластичные смазочные материалы

Пластичные (консистентные) смазки – минеральные масла (густые мази), загущенные солями высших жирных кислот – мылами. Предназначены для смазывания подшипников качения, шарниров, рычажных и кулачковых систем и др. Хорошо удерживаются на наклонной и вертикальной поверхностях, не выдавливаются из контакта, обладают хорошей смазочной способностью в довольно широком интервале температур, способны герметизировать узел, обеспечивают малый расход смазки, позволяют упростить конструкцию узла, сни-

зить металлоемкость, сократить затраты на обслуживание, обеспечивают меньшее загрязнение окружающей среды. К числу недостатков относятся: низкий теплоотвод, отсутствие удаления продуктов изнашивания, худшая работа при отрицательных температурах.

Твердые смазочные материалы

Твердые смазочные материалы – материалы, обеспечивающие смазку между поверхностями трения в условиях сухого или граничного трения в экстремальных условиях (высокие температуры, глубокий вакуум, излучение, невозможность (недопустимость) присутствия жидкости), где нельзя применять вышерассмотренные смазочные материалы. Твердые смазочные материалы могут не принадлежать ни к одному из элементов трибосистемы или выступать в качестве наполнителя к композиционному антифрикционному материалу или входить в состав покрытия одного или обоих элементов.

Твердые (твердопленочные) смазочные покрытия на трущихся поверхностях могут образовываться несколькими способами: нанесением суспензии из твердого смазочного материала со связующим с последующей сушкой (полимеризацией); осаждением порошка и втиранием его в поверхность; образованием пленки в результате химических реакций непосредственно на поверхности.

Химические вещества и соединения, имеющие свойства твердой смазки: графит (C), фторографит (CF_x)_n, нитрид бора (BN); дисульфид молибдена (MoS_2), вольфрама (WS_2), тантала (TaS_2), диселенид молибдена (MoSe_2), вольфрама (WSe_2), ниобия (NbSe_2), тантала (TaSe_2); йодид кадмия (CdI_2), свинца (PbI_2), висмута (BiI_2), ртути (AgI); дисульфид сурьмы (SbS_2); дифторид бария (BF_2), кальция (CaF_2); дихлорид циркония (ZrCl_2) и другие. Кроме того, как твердые смазки используются покрытия из мягких металлов (Pb, Sn, Cd, In, Ga, Au), а также некоторые полимерные материалы.

Графит обладает антифрикционными свойствами в паре трения со сталью, чугуном и хромом (несколько хуже с медью и алюминием). В присутствии воздуха и воды графитная смазка улучшает свои показатели. Способен адсорбироваться на поверхностях трения с образованием прочной пленки, ориентированной в направлении скольжения. Температурный предел работоспособности графитной смазки 600 °C, коэффициент трения по стали 0,04...0,08.

Дисульфид молибдена MoS_2 – синевато-серый порошок с металлическим блеском, обладает хорошими адсорбционными способностями по отношению к большинству черных и цветных металлов. Смазочная способность MoS_2 обу-

словлена выраженным слоистым строением кристаллов и сильной поляризацией атомов серы в процессе трения. В отличие от графита при увеличении нагрузки и температуры коэффициент трения MoS_2 уменьшается (средняя величина 0,05...0,095). При температурах выше 500 °С MoS_2 окисляется с выделением SO_2 . Дисульфид молибдена обладает высокой радиационной стойкостью. Химически активен, относительно легко вступает в реакцию с водой и кислородом. Максимально допустимая температура эксплуатации 450 °С. Водород восстанавливает MoS_2 до металла.

Дисульфид вольфрама – большая термостойкость (580 °С), стойкость к окислению, несущая способность в 3 раза выше, чем у дисульфида молибдена. Химически инертен (кроме фтора и его соединений), коррозионно неагрессивен, нетоксичен, применение ограничено высокой стоимостью. Рекомендуется использовать при температурах свыше 450 °С.

Нитрид кремния – хорошие механические характеристики и высокая термическая и термоокислительная устойчивость (до 1200 °С). Перспективный материал при изготовлении деталей цилиндрико-поршневой группы теплонатяженных двигателей.

Нитрид бора обладает высокой термической и термоокислительной устойчивостью (разлагается при температуре свыше 1000 °С).

Фталоцианины – металлосодержащие полициклические органические соединения, обладающие крупными плоскими молекулами со слабыми межмолекулярными связями. Наряду с физической адсорбцией образуют хемосорбированные пленки на поверхностях металлов. Обладают хорошей термической (до 650 °С) и радиационной стойкостью, стабильны при контакте с воздухом и водой.

Мягкие металлы (свинец, индий, олово, кадмий, медь, серебро, золото и др.) обладают низкой прочностью на срез и благодаря этому могут применяться в качестве смазок, наносимых в виде тонких слоев (пленок) на более прочные основы. Поведение пленок этих металлов во многом сходно с маслами. Кроме того, они обладают свойством облегчать и ускорять процесс приработки.

Композиционные смазочные материалы (КСМ) – комбинация отдельных видов твердых смазок, обеспечивающая оптимальное сочетание смазочных свойств, механической прочности и обрабатываемости. Представляет собой структурный каркас-матрицу из полимерных, металлических или керамических материалов (она обуславливает заданные механические свойства), в которой зафиксированы материалы-наполнители, обеспечивающие смазочные свойства КСМ. Преимущества: хорошие смазочные свойства, химическая инертность, ус-

талостная прочность, малая масса, низкая чувствительность к локальным нарушениям структуры (трещинам, надрезам), термостойкость (КСМ на основе ароматических полиамидов могут длительно эксплуатироваться при 450 °С). Основные недостатки – большой коэффициент термического расширения, низкие теплопроводность, термическая стойкость и стабильность. На основе КСМ разрабатывают узлы трения (вплоть до коренных вкладышей и поршневых колец), не требующие замены в течение всего моторесурса двигателя.

3.2.5. Магнитные жидкости

Магнитная (ферромагнитная) жидкость (МЖ) – жидкость, поляризующаяся в присутствии магнитного поля. Представляет собой устойчивые коллоидные дисперсии твердых магнитных частиц в жидком носителе (вода, углеводороды, минеральные масла, силиконы и др.). Дисперсная фаза состоит из частиц ферромагнитных материалов (магнетит, ферриты, железо, никель, кобальт) размером 3...10 нм. Для предотвращения слипания частиц между собой в МЖ добавляют поверхностно-активные вещества (олеиновая кислота, полиакриловая кислота, полиакрилат натрия, соевый лецитин).

Процесс получения МЖ состоит из двух основных стадий: получение магнитных частиц коллоидных размеров и стабилизация их в жидкой основе, причем обе стадии совмещены во времени: чтобы предотвратить слипание частиц под действием сил притяжения.

Частицы коллоидных размеров получают двумя методами: выращиванием (методы конденсации) или измельчением грубодисперсных частиц (методы диспергирования).

МЖ сочетают в себе свойства ферромагнетиков (способность взаимодействовать с внешним магнитным полем) и жидкости (изменять или поддерживать форму своей поверхности под действием внешних сил). По совокупности этих свойств характеризуются как жидкие ферромагнетики.

МЖ обладают рядом уникальных для жидкостей свойств, что делает возможным их разнообразные технические применения. К ним относятся:

1. Намагниченность

2. Вязкость. В МЖ, кроме гидродинамического, есть и магнитное взаимодействие частиц, влияющее на их относительное движение. Вращательная вязкость определяется не вязкостью основы, а вязкостью МЖ в отсутствие магнитного поля.

3. Поверхностное натяжение. Изменение коэффициента поверхностного натяжения зависит от взаимодействия магнитных частиц и молекул жидкой фазы (при отсутствии поля) и взаимодействия магнитных частиц во внешнем поле. Магнитное поле влияет на явление смачивания МЖ твердых поверхностей и с помощью магнитного поля можно управлять основными характеристиками на линии контакта трех фаз.

4. Электрическая проводимость.

5. Теплопроводность и теплоемкость. Присутствие твердой фазы в МЖ увеличивает ее теплопроводность, так как коэффициент теплопроводности магнетита в среднем более чем на порядок превышает теплопроводность используемых жидких основ.

Наиболее широко используемые свойства магнитных жидкостей – способность удерживаться в определенной точке пространства магнитным полем и магнитожидкостная левитация, т.е. выталкивание немагнитных тел из МЖ, находящейся под действием неоднородного магнитного поля.

Первое свойство используется для создания герметизаторов, экономичных и бесшумных узлов трения, муфт, второе – для создания высокоэффективных демпферов, амортизаторов, сепараторов. Также МЖ применяются для предотвращения загрязнения окружающей среды, для очистки и промывки изделий, для пропитки пластмасс, резины и др. материалов, как смазочно-охлаждающие жидкости, в энергетике, медицине, вычислительной технике и автоматике, приборостроении, строительстве, сельском хозяйстве и т. д.[22, 35].

МЖ в качестве «интеллектуального элемента» используют в устройствах управления (силовые, скоростные и пр.).

Феррогидродинамика – раздел гидродинамики, изучающий феррожидкости – искусственные жидкие среды, обладающие уникальным сочетанием свойств текучести и способности поляризоваться в присутствии магнитного поля.

ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ПАР ТРЕНИЯ

4.1. Задачи конструктора в повышении долговечности и надежности узлов трения

Основные *конструкторские задачи* повышения надежности узлов трения:

- оценка и выбор схем узла трения машины с позиции влияния ее на износостойкость и надежность конструкции;
- выбор материалов пары трения;
- назначение размеров и формы деталей;
- обеспечение нормальной работы узла трения в заданном режиме и защита от перегрузок;
- обеспечение эксплуатации с минимальными затратами;
- защита узла трения от аварийных повреждений.

4.2. Оценка и выбор схемы узла трения

Для пары, образованной поверхностями трения, имеющими разные твердость и размеры, можно выделить два условия:

1. $H_1 > H_2; S_1 < S_2;$
2. $H_1 < H_2; S_1 < S_2,$

где H_1, H_2 – твердости поверхностей трения; S_1, S_2 – соответствующие площади поверхностей.

Пару с расположением материалов, удовлетворяющим первому условию, называют *прямой парой трения*, а удовлетворяющим второму условию – *обратной парой*. В случае прямой пары трения по большей поверхности скользит более твердое тело, а в случае обратной пары – более мягкое тело (рис. 2.29).

Податливость детали, общая или местная, позволяет ее рабочей поверхности следовать за деформацией сопряженной детали и приспособляться к неточностям ее геометрической формы (например, самоустанавливающийся опорный подшипник).

Для некоторых узлов трения повышению износостойкости способствует *увеличение жесткости конструкции*. Например, чем равномернее распределена нагрузка по длине зуба зубчатых передач, тем выше их нагрузочная способность. Неточность изготовления и сборки деталей передачи, изгиб и кручение валов в процессе работы способствует неравномерному распределению нагрузки. Поэтому увеличение жесткости валов, опор и корпусов является благоприятным фактором в повышении работоспособности изделий.

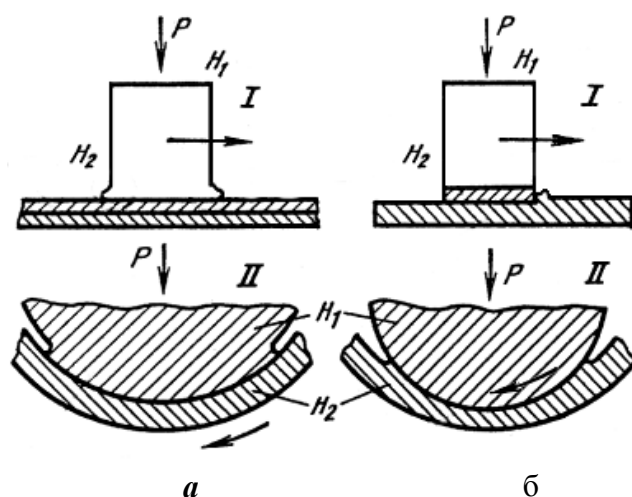


Рис. 2.29. Обратные (а) и прямые (б) пары трения:

I – с поступательным движением; II – с вращательным движением; H_1 , H_2 – твердости

4.3. Выбор материалов пары трения

Основные правила выбора материалов трибосистем скольжения:

- а) более рациональным является сопряжение материалов с существенно разной твердостью;
- б) возможно сопряжение одноименных упрочненных материалов (сталей после термической или химико-термической обработок);
- в) нерациональным является использование одноименных материалов и материалов с низкой твердостью;
- г) следует использовать (где это возможно) взамен металлов и их сплавов неметаллические материалы.

В зависимости от назначения трущиеся детали изготавливают из конструкционных, фрикционных, износостойких и антифрикционных материалов широкой номенклатуры.

Все пары трения должны обладать **антифрикционностью**, под которой понимают комплекс свойств: достаточная статическая и динамическая прочность при повышенных температурах; способность образовывать прочный граничный слой смазочного материала и быстро восстанавливать его при разрушении; низкий коэффициент трения; отсутствие заедания на валу при перерыве смазки; высокие теплопроводимость, теплоемкость, прирабатываемость; хорошая износостойкость; не дефицитность и технологичность.

В качестве антифрикционных материалов широко используются спеченные прессованные порошковые материалы из железа или меди с добавками графита, дисульфида молибдена и др. подобных материалов. Они обладают высокими антифрикционными свойствами, при недостатке смазки дополнительно могут пропитываться маслом.

4.4. Критерии работоспособности материалов в парах трения

Оценку правильности выбора материалов пар трения и конструкции узла при проектном расчете пар трения скольжения производят по некоторым критериям:

- расчет по среднему давлению p . Способ применим для пар трения, работающих с малыми скоростями скольжения при невысоких температурах окружающей среды. Основная задача – предотвращение заедания и схватывания исключением механических перегрузок контакта.
- расчет по величине pv . Способ применим, когда режим трения пары определяется не только давлением, но и скоростью скольжения v . Допустимое значение параметра pv подбирают при этом в зависимости от скорости скольжения, способа теплоотвода, характера действия нагрузки и других условий. Параметр pv также косвенно характеризует температуру поверхности трения, которая в явном виде не входит в число заданных при расчете величин. Дополнительно следует лимитировать $[p]$.

В инженерной практике оба расчетных критерия $[p]$ и $[pv]$ часто используют совместно. См. также *Критические параметры изнашивания*.

В качестве примера приведены допускаемые величины $[p]$, $[v]$ и $[pv]$ для некоторых марок бронз (табл. 2.1).

- режим работы подшипников скольжения определяется значениями вязкости $[\eta]$, скорости скольжения $[v]$ и давления $[p]$. Параметр $[\eta v/p]$, называют характеристикой режима подшипника.

Условия перехода режимов смазки одного в другой иллюстрирует диаграмма Герси, рис. 2.30.

Параметр $[\eta v / p]$ является характеристикой режима для полужидкостной смазки. На диаграмме Герси указаны три области: 1 – трение без смазочного материала (отделяет линия $b - b$); 2 – трение при граничной и полужидкостной смазке (отделяет линия $a - a$) и 3 – область жидкостной смазки.

Таблица 2.1. Бронза для подшипников скольжения

Марка и стандарт	Область применения	Допускаемый режим работы		
		$[p]$, кгс/см ²	$[v]$, м/с	$[pv]$, кгс·м/ (см ² ·с)
БрОФ 10-1 литейная БрОФ 6,5-0,15 (ГОСТ 5017-2006) Обрабатывается давлением	Подшипники турбин, электродвигателей, генераторов, центробежных насосов, компрессоров и т. п. машин, работающих с постоянной нагрузкой	150	10	150
БрОЦС 5-5-5		80	3	120
БрОЦС 6-6-3		50	3	100
БрОЦС 4-4-17 литейные (ГОСТ 613-79)		100	4	100
БрАЖ 9-4 прутки и поковки БрАЖ9-4Л литейная	Подшипники редукторов, металлорежущих станков, транспортеров, центробежных насосов, прокатных станов и пр.	150	4	120
БрАЖМц 10-3-1,5 прутки, поковки, литье		200	5	150
БрАЖС 7-1,5-1,5 литейная (ГОСТ 493-79)		250	8	200
БрС30 литейная, отливка в металлическую форму	Подшипники двигателей внутреннего сгорания, поршневых компрессоров и насосов и других машин, работающих с переменной и ударной нагрузками	250	12	300

Примечание. Значения $[v]$ и $[pv]$, указанные в таблице, не относятся к режиму жидкостного трения.

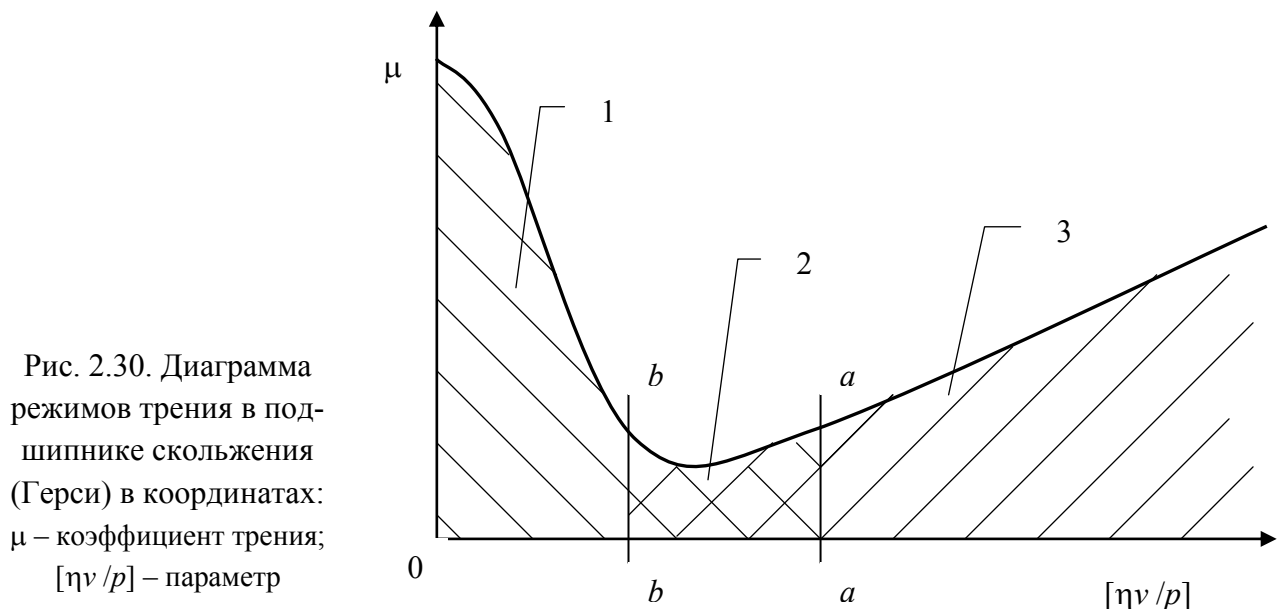


Рис. 2.30. Диаграмма режимов трения в подшипнике скольжения (Герси) в координатах: μ – коэффициент трения; $[\eta v / p]$ – параметр

Большинство пар трения машин работают при граничной или полужидкостной смазке.

Расчеты режимов смазки приведены в специальной литературе [5, 24, 43, 44].

4.5. Использование принципа плавающих деталей

Принцип плавающей детали – способность одной из деталей сопряжения ограниченно перемещаться относительно другой детали, что позволяет устранить местные концентрации напряжений и вероятность заедания; снижает местный износ, уменьшает тепловыделение в сопряжении и т.д. Также плавающие элементы предусматриваются для компенсации тепловых деформаций деталей сопряжения, рис. 2.31.

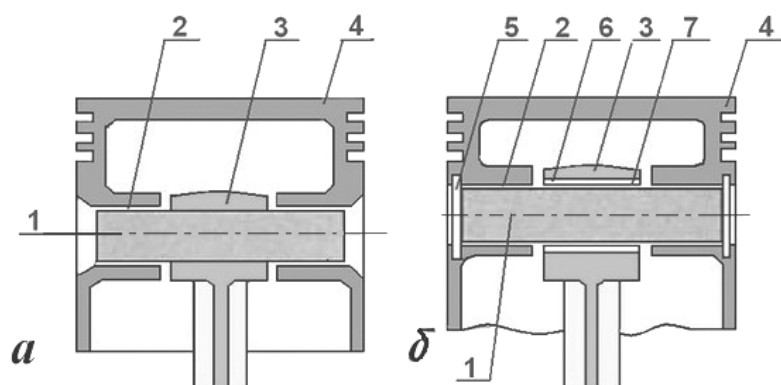


Рис. 2.31. Схема установки поршневого пальца:

а – фиксированный палец;

б – плавающий палец.

1 – поршневой палец; 2 – зазор между пальцем и бобышкой;

3 – шатун; 4 – поршень; 5 – стопорное кольцо пальца; 6 – бронзовая втулка поршневой головки шатуна; 7 – зазор между пальцем

и бронзовой втулкой

4.6. Замена внешнего трения внутренним трением упругого элемента

В парах с небольшими взаимными перемещениями жесткие звенья могут быть заменены неподвижными соединениями, а взаимное смещение звеньев в процессе их работы достигается за счет деформации специальной эластичной детали;

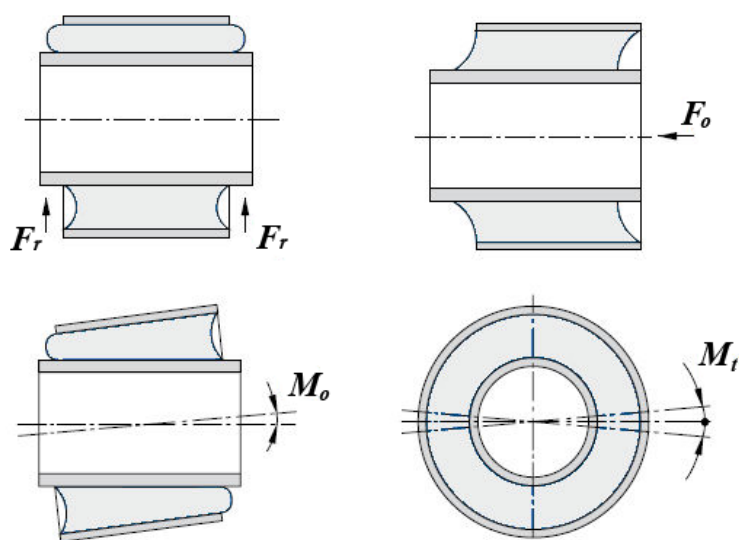


Рис. 2.32. Деформация резинометаллического шарнира при различных нагрузках

при этом внешнее трение скольжения или качения заменяется внутренним трением упругого элемента.

Пример такой замены – конструкция сайлентблока (резинометаллического шарнира), в котором подвижность обеспечивается за счет эластичности резины, рис. 2.32. Узел работает без внешнего трения, что позволяет устранить операции обслуживания

и смазывания, увеличить срок службы узла, снизить уровень вибраций. Также резинометаллические шарниры могут компенсировать допуски изготовления и монтажа других конструктивных элементов, что позволяет снизить себестоимость изготовления, сборки и ремонта узла.

Главное условие надежной работы резинометаллического шарнира – отсутствие взаимного проскальзывания между эластомерными и металлическими деталями, что исключает силы трения и ускоренный износ эластичного материала.

4.7. Замена трения скольжения трением качения

Подшипники качения имеют следующие преимущества по сравнению с подшипниками скольжения [18]:

- более точное центрирование вала;
- низкий коэффициент трения;
- малая зависимость коэффициента трения от режима работы;
- небольшие моменты сопротивления в период пуска;
- небольшие осевые размеры;
- небольшой расход масла;
- способность работать в большом интервале температур (при использовании специальных конструктивных и смазочных материалов);
- способность работать в вакууме;
- подшипники качения взаимозаменяемы, что облегчает монтаж и ремонт подшипниковых узлов;

Недостатки подшипников качения:

- значительно меньшая грузоподъемность и долговечность упорных подшипников качения по сравнению с подшипниками скольжения (при тех же размерах);
- высокая стоимость;
- жесткость работы;
- отсутствие демпфирования колебаний нагрузки;
- шум во время работы;
- сложность установки и монтажа подшипниковых узлов;
- чувствительность к неточности монтажа;
- невозможность разъема в медианной плоскости;
- металлический контакт между телами качения и кольцами подшипника;

- долговечность резко падает с увеличением нагрузки и числа циклов нагружения.
- сложность изготовления и монтажа, если ввиду особенностей конструкции вала требуются разъемные опоры (например, для коленвалов).



Рис. 2.33. Шарико-винтовая пара

Например, для высокоскоростных прецизионных станков вместо втулок скольжения применяется шарико-винтовая передача, рис. 2.33. Такая конструкция обеспечивает высокую точность, большой ресурс, значительное снижение трения и КПД до 90 %, что позволяет использовать всю мощность шаговых двигателей на полезную работу.

4.8. Выбор зазоров в сопряжениях

Величина зазоров в подвижных сопряжениях определяется рядом факторов:

- величиной и характером действия нагрузки;
- скоростью скольжения;
- тепловым режимом узла и влиянием температурных деформаций;
- количеством и способом подачи смазки.

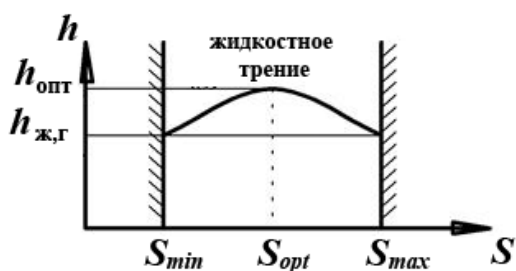


Рис. 2.34. Влияние величины зазора в подшипнике скольжения на толщину смазочной пленки:

h – толщина пленки смазки;
 $h_{ж,г}$ – граница жидкостной смазки

На рис. 2.34. показана зависимость толщины пленки смазки h от величины зазора для гладких цилиндрических соединений.

4.9. Снижение уровня контактных напряжений

Снижение уровня контактных напряжений достигается путем замены линейной или точечной области контакта на контакт поверхностей, рациональ-

ным взаимным расположением деталей в системе с учетом вида нагружения и их геометрических характеристик и т.п.

Например, в быстроходных зубчатых передачах боковые поверхности зубьев колес подвергаются профильному и высотному фланкированию, то есть удалению материала в местах концентрации напряжений (см. *Макропрофилирование*).

4.10. Обеспечение граничного трения вместо сухого или полусухого

Использование более совершенного смазывания, переход от сухого трения незащищенных поверхностей к трению со смазкой (твердые смазочные материалы, покрытия, обеспечивающие относительно низкий коэффициент трения при повышенных (больше 1000 °С) и низких температурах, в вакууме, при высоких нагрузках (статических, динамических, циклических) и в других экстремальных условиях эксплуатации узлов трения).

Например, устройство для предпускового смазывания подшипников герметичных фреоновых компрессоров (а. с. СССР № 842263) обеспечивает автоматическую подачу смазки перед каждым пуском машины с целью уменьшения или исключения пусковых износов. Благодаря этому устройству каждый последующий пуск осуществляется в условиях гидродинамического режима смазки, причем масло, накапливаемое для этого в аккумуляторе в процессе работы компрессора, проходит качественную дегазацию и дополнительно дегазируется при пуске [55, 56]. На рис. 2.35 представлен чертеж устройства предпусковой смазки в составе герметичного компрессора.

При вращении вала 2 масло из нагнетателя 10 поступает в основной канал 5 и оттуда через отверстия 6 и 3 и канавки 4 подводится к подшипникам 7. При этом через отверстия 1 и основной канал 5 осуществляется дегазация масла в подкожущее пространство 11. Это повышает качество смазки, поступающей к поверхностям подшипников, которая, попадая под давле-

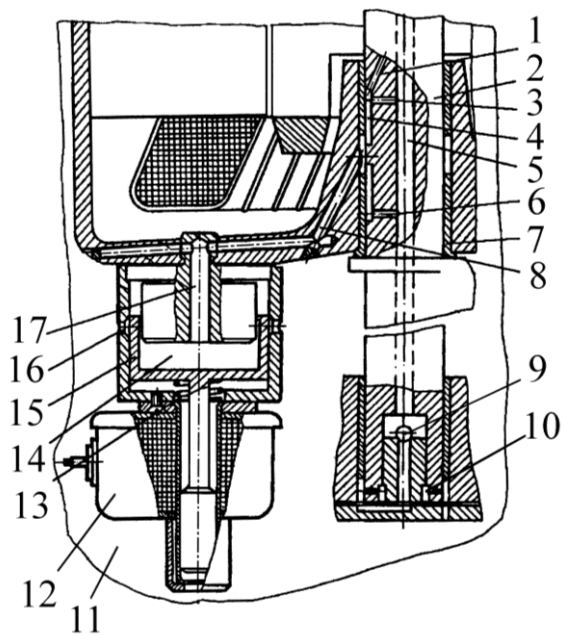


Рис. 2.35. Устройство для предпускового смазывания герметичного компрессора

нием из канала 8 в отверстие 17, заполняет аккумулятор 14 и, перемещая подпружиненный поршень 15 вниз, вытекает через отверстия 16 в подкожное пространство 11. При остановке компрессора давление масла в системе падает, в результате чего пружина 13 поднимает поршень 15, и он перекрывает отверстия 16. Надпоршневое пространство аккумулятора 14 остается заполненным маслом, количество которого определяется из условия заполнения всех каналов системы смазки, расположенных выше обратного клапана 9. Перед последующим пуском компрессора при подаче управляющего сигнала на электромагнитный привод 12, последний воздействует непосредственно на поршень 15, который вытеснит масло из аккумулятора 14 в отверстие 17 и канал 8, после чего масло заполнит канавки 4, отверстия 6, 3 и основной канал 5 до обратного клапана 9.

4.11. Противодействие схватыванию поверхностей

Реализуется подбором сопряженных материалов, видов механической и упрочняющей обработки, режимов трения и вида смазочного материала, рациональным выбором зазоров. Большое значение также имеют способы и режимы охлаждения трибосистем.

Например, с целью исследования триботехнических характеристик различных антизадирных покрытий в Центральной заводской лаборатории ГП «Завод им. Малышева» (г. Харьков) по стандартным методикам были проведены испытания на машинах трения типа СМЦ-2 и СМТ-1 при ступенчатом нагружении до 6 МПа по схеме «диск-колодка»³.

Исследуемые покрытия наносились на «диски» из сплава АК4-1 и «колодки» из гильзового чугуна. Для сравнения испытаны образцы без покрытия.

В табл. 2.2 приведены составы исследованных покрытий, значения их микротвердости, толщины, результаты измерения величины износа.

Анализ результатов испытаний показал, что образцы сплава АК4-1 без покрытия интенсивно изнашиваются, и что начало задирообразования наступает существенно быстрее.

³ Патент RU 2585112. Композиционное покрытие для алюминия или его сплавов. Сагалович Алексей Владиславович (UA), Сагалович Владислав Викторович (UA). Заявл. 22.01.2014. Оpubл. 27.05.2016.

Таблица 2.2. Составы, свойства и результаты испытаний антизадирных покрытий

№	Состав	Микро- твёрдость, ГПа	Толщина, мкм	Износ диска, г	Износ колодки, г	Относитель- ное увеличе- ние стойкости
1	Без покрытия			0,0343	+0,0004	1
2	Mo	4,0	4...5	0,0632	0,0001	2,1
3	AlN	30	5...6	0,0006	0,1233	64,2
4	TiN	22	5...6	0,0023	0,0476	28,7
5	Mo + Mo ₂ N	25	(~0,3)+(4...5)	0,0180	0,0497	56
6	(TiN – AlN) на- нокомпозит	35	5...6	0,0006	0,0340	87,9
7	(AlN – Ti) на- нокомпозит	20	5...6	0,0716	0,0007	0,7
8	AlN + Al	30	(5...6) + 0,1	0,0008	0,0295	47,6
9	Mo + Mo ₂ N + Mo	25	(~0,3) + (2...2,5) + (~2,5)	0,0064	0,0003	20,6

4.12. Обеспечение одинакового износа элементов

Обеспечение одинакового износа элементов трибосистемы достигается выбором соответствующих материалов и способов упрочнения поверхностей износа. Кроме этого, эффективным является создание оптимальной формы контактирующих поверхностей деталей с целью изменения величины и распределения контактных давлений. В процессе износа также может осуществляться автооптимизация поверхностей трения, способствующая выравниванию скоростей износа деталей.

Например, метод дифференцированного упрочнения поверхности втулки ДВС [9, 48] позволяет выровнять эпюру износа по высоте (рис. 2.36).

4.13. Компенсация износа

Этот конструктивный прием позволяет обеспечить стабильность показателей работоспособности трибосистемы, несмотря на постоянный износ их деталей (упругие поршневые кольца ДВС и компрессоров, контактные щетки электродвигателей и др.). Компенсация износа в узлах трения может осуществляться вручную, путем самокомпенсации и автокомпенсации (рис. 2.37).

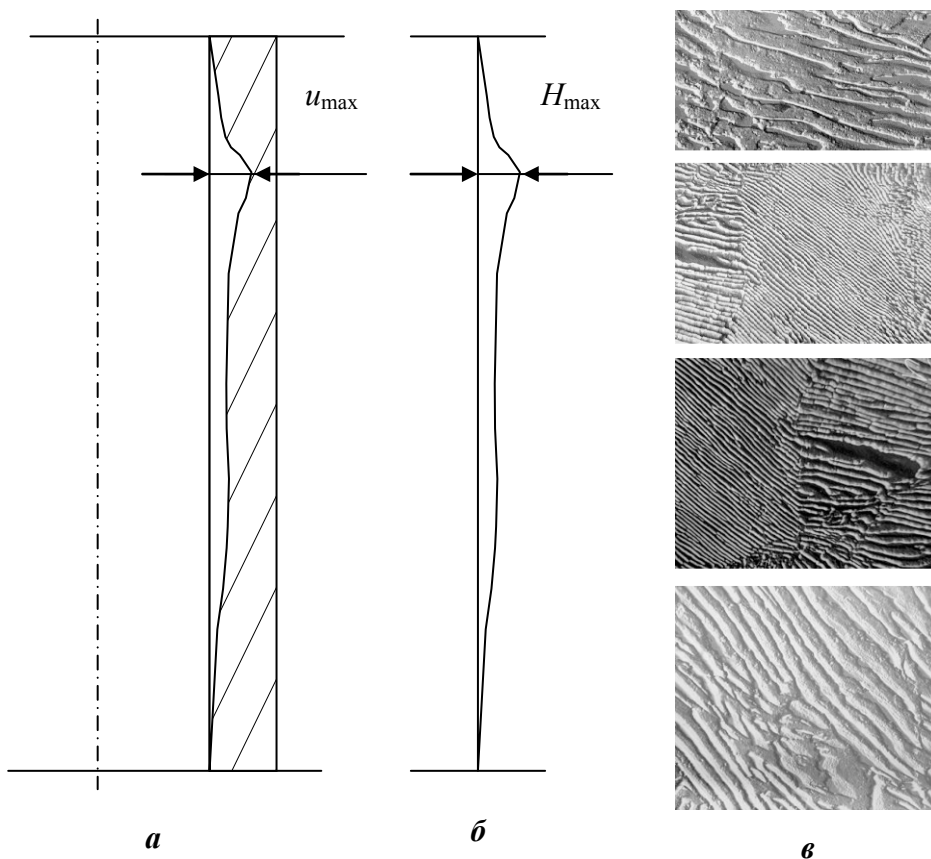


Рис. 2.36. Дифференциальное упрочнение:

а – износ гильзы цилиндра ДВС; u_{max} – максимальный износ; **б** – эпюра упрочнения рабочей поверхности гильзы; H_{max} – максимальная твердость рабочей поверхности цилиндра; **в** – микроструктура различных участков втулки, изготовленной отливкой в песчано-глинистые формы с принудительным охлаждением, $\times 6000$

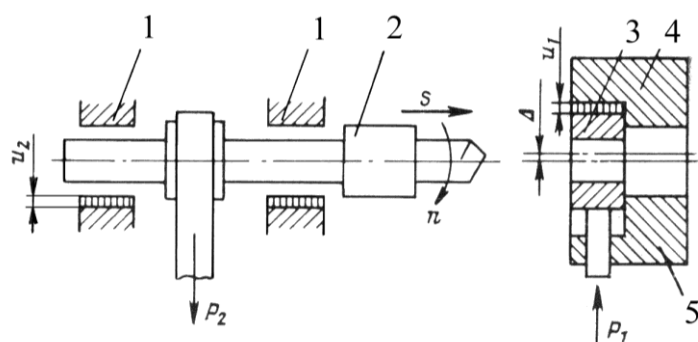


Рис. 2.37. Компенсация изнашивания размерной цепи сверлильного автомата:

1 – подшипники шпинделя; 2 – шпиндель; 3 – заготовка; 4 – неподвижная губка зажимного устройства; 5 – подвижная губка зажимного устройства

По мере изнашивания этих пар трения будет происходить смещение оси обрабатываемого отверстия. Если износы u_2 и u_1 направлены в разные стороны, то смещение будет большим, так как $\Delta = u_1 + u_2$. И наоборот, при одинаковом направлении износа срок службы этой механической системы возрастает: $\Delta = u_1 - u_2$, так как смещения частично скомпенсируются. Чтобы это произошло, следует подвижную губку разместить с противоположной стороны и подобрать такие материалы и технологии упрочнения, чтобы интенсивность изнашивания подшипников и губки была примерно одинаковой.

4.14. Способы защиты рабочих поверхностей пар трения от загрязнений

Способы защиты поверхностей трения от загрязнения определяются назначением механизма или машины, конструкцией узла, условиями эксплуатации, требованиями к кинематической точности и другими факторами. Защиту от загрязнения можно подразделить на защиту открытых узлов трения; герметизацию закрытых корпусов в местах выхода валов или других подвижных деталей; очистку смазывающего масла; удаление загрязнений из топлива, смазки, воздуха, а также газов и жидкостей, поступающих во внутренние полости машины (см. рис. 2.38).



Рис. 2.38. Виды масляных фильтров

ЧАСТЬ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАР ТРЕНИЯ

ГЛАВА 1. МАКРО- И МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ, ВЫБОР МЕТОДА

1.1. Формообразование рабочих поверхностей деталей механических систем

Прежде чем создавать на рабочих поверхностях деталей триботехнологическое качество, необходимо сформировать совокупность взаимосвязанных поверхностей, которая представляет служебное назначение детали. Каждый из этих элементов отправляет строго заданную функцию. Не должно быть в этой совокупности ни недостающих, ни излишних поверхностей.

Все поверхности в детали находятся в определенном размерноточностном геометрическом единстве, которое необходимо и достаточно определяет функциональную работоспособность изделия.

Размеры поверхностей и их точность задаются конструктором, исходя из служебного назначения машины, узла и конкретной детали и других технико-экономических показателей.

Только конструктор знает (или не знает), какие размерноточностные параметры должны быть у той или иной поверхности, в расположении этих по-

верхностей относительно друг друга. Творец машин не может произвольно задавать эти параметры, но лишь в интересах своего творения, в обеспечении его долговечности, безотказности, технической элегантности. На основании своих знаний, опыта, технических условий, сформулированных заказчиком, технологических возможностей конструктор рассчитывает размеры и допуски на них, которые и наносит на чертежи [18, 23, 29, 40].

При этом он пользуется соответствующими стандартами (табл. 3.1-3.3).

Конструкторская документация в бумажном или электронном виде – единственный законный виртуальный продукт, который обладает образом изделия.

Чтобы получить из виртуальной реальную машину, конструкторскую документацию передают другому специалисту – технологу. Задачи технолога не только отличаются своей спецификой, они еще и по-своему сложнее.

На чертеже одной из поверхностей стоит однозначное значение размера и допуска на него. Но изготовитель далеко не всегда может получить конструкторские значения на какой-то одной операции. Особенно если это касается наукоемкого изделия. Например, поверхность задана размером $\varnothing 100$ мм с допуском $T = 1$ мкм и шероховатостью $Ra = 0,16$ мкм. Получить поверхность с такими значениями возможно тонким шлифованием. Но начинается-то технолог с заготовки! А заготовка имеет очень и очень неточные размеры. Поэтому, чтобы дойти до тонкого шлифования, заготовка пройдет по крайней мере черновое точение, получистовое точение и чистовое точение.

И на каждом переходе технолог будет работать со своими технологическими размерами и допусками на них, которые он должен рассчитать, исходя из ожидаемой точности, табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 3.3.

ОТК принимает изделие по значениям, указанным конструктором на чертеже.

Технологические знания, необходимые для изготовления детали, обладающей триботехнологическим качеством, или предворяющие его, изложены в специальной литературе [23]

Таблица 3.1. Точность и качество поверхности при обработке наружных цилиндрических поверхностей

Обработка	Параметр шероховатости Ra , мкм	Глубина дефектного слоя, мкм	Квалитет допуска размера, IT по ГОСТ 26347-82	Степень точности формы по ГОСТ 24643-81
Обтачивание:				
черновое	50...6,3	120...60	14...12	13...9
получистовое или однократное	25...1,6	50...20	13...11	12...8
чистовое	6,3...0,4	30...20	10...8	9...5
Обтачивание тонкое	1,6...0,2	10...5	9...6	8...3
Шлифование:				
предварительное	6,3...0,4	20	9...8	8...5
чистовое	3,2...0,2	15...5	7...6	6...3
тонкое	1,6...0,1	5	6...5	5...2
Притирка, суперфиниширование	0,8...0,1	5...3	5...4	4...1
Обкатывание, алмазное выглаживание	0,8...0,05	–	10...5	9...2

Таблица 3.2. Точность и качество поверхности при обработке отверстий

Обработка	Параметр шероховатости Ra , мкм	Глубина дефектного слоя, мкм	Квалитет допуска размера, IT по ГОСТ 26347 – 82	Степень точности формы по ГОСТ 24643-81
Сверление и рассверливание	25...0,8	70...15	13...9	12...6
Зенкерование черновое	25...6,3	50...20	13...12	12...9
Зенкерование однократное пролитого или прошитого отверстия; чистовое после чернового или сверления	25...0,4	50...20	13...8	12...5
Развертывание				
нормальное	12,5...0,8	25...15	11...10	10...7
точное	6,3...0,4	15...5	9...7	8...4
тонкое	3,2...0,1	10...5	6...5	5...2
Протягивание черновое литого или прошитого отверстия	12,5...0,8	25...10	11...10	10...7
чистовое после чернового или после сверления	6,3...0,2	10...5	9...6	8...3
Растачивание				
черновое	25...1,6	50...20	13...11	11...8
чистовое	6,3...0,4	25...10	10...8	9...5
тонкое	3,2...1,6	10...5	7...5	6...2
Шлифование				
предварительное	6,3...0,4	25...10	9...8	8...5
чистовое	3,2...0,2	20...5	7...6	6...3
тонкое	1,6...0,1	10...5	5	4...2

Обработка	Параметр шероховатости по верхности Ra , мкм	Глубина дефектного слоя, мкм	Квалитет допуска размера, IT по ГОСТ 26347 – 82	Степень точности формы по ГОСТ 24643-81
Притирка, хонингование	1,6...0,1	5...3	5...4	4...1
Раскатывание, калибрование, алмазное выглаживание	6,3...0,1	–	10...5	9...2

Таблица 3.3. Точность и шероховатость плоских поверхностей при различных методах обработки

Метод обработки	Квалитет допуска размера, IT по ГОСТ 26347 – 82	Шероховатость по ГОСТ 2789 – 73, Ra , мкм
Строгание и фрезерование цилиндрическими и торцевыми фрезами:		
черновое	14...11	20...1,25
получистое и однократное	12...11	5...1,25
чистовое	10	2,5...0,63
тонкое	9...7	2,5...0,15
Шлифование:		
однократное	9...8	2,5...0,15
предварительное	9	2,5...0,32
чистовое	8	0,63...0,08
тонкое	7	0,32...0,04

Примечания: 1) Данные относятся к обработке жестких деталей с габаритными размерами не более 1 м при базировании по чисто обработанной поверхности и использовании ее в качестве измерительной базы. 2) Точность обработки торцевыми фрезами при сопоставимых условиях выше, чем цилиндрическими, примерно на один квалитет. 3) Тонкое фрезерования производят только торцевыми фрезами.

Обработка поверхностей трения:

~ **резанием** – обработка металлов со снятием слоя стружки для получения заданных формы, размеров и обеспечения определенной *шероховатости* поверхности. Осуществляется на металлорежущих станках или вручную металлорежущим инструментом. Виды: точение, строгание, сверление, развертывание, протягивание, фрезерование, зубофрезерование, шлифование, хонингование.

~ **абразивом** (от лат. *abrasio* – соскабливание) – процесс обработки материалов, заключающийся в снятии тонкого слоя металла абразивным инструментом. К методам абразивной обработки относятся шлифование, хонингование.

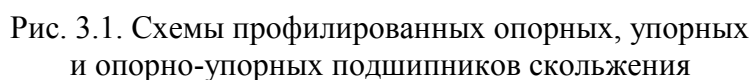
ние, притирка, доводка и др. Абразивные инструменты изготавливают из размельченных абразивных материалов и связующих веществ (шлифовальные круги, шлифовальные и доводочные бруски, головки, сегменты, шкурки и изделия из них – диски, ленты и др., а также шлифовальные порошки, доводочные пасты и спец. эмульсии).

~ **давлением** – процессы формоизменения заготовок без нарушения их сплошности, т. е. пластическое деформирование под влиянием приложенных внешних сил. Основные методы обработки давлением: прокатка, прессование, волочение, ковка, штампование.

Шевингование (англ. *shaving*, от *shave* – брить, скоблить) – отделочная обработка боковых поверхностей зубчатых и червячных колес (твердостью до 40...45 HRC) путем снятия тонкой стружки многолезвийным инструментом **шевером** – режущим колесом с косыми зубьями, на боковых поверхностях которых прорезаны поперечные канавки. Края канавок способны соскабливать стружку толщиной 0,005...0,01 мм. Шевер вводят в зацепление с колесом под некоторым углом, что при вращении приводит к скольжению шевера по отношению к колесу. Кроме того, колесо перемещается дополнительно вдоль оси с подачей 0,1...0,3 мм/об. Шевингованием достигают точности качества IT 8 и шероховатости $Ra = 0,64$ мкм. Время обработки одного зуба 2...3 с.

1.2. Макропрофилирование поверхностей трения

Макропрофилирование поверхности трения – создание на технологическом этапе специфической макрогеометрии поверхностей трения, отвечающей оптимальным режимным трибологическим характеристикам пары трения в период эксплуатации. Основные задачи, решаемые методами макропрофилирования – устранение или снижение ударных нагрузок, повышение подъемной силы гидродинамического слоя смазки, улучшение условий смазывания, повышение плавности сопряжения в начале и конце контактирования, т. е. повышение несущей способности, увеличение долговечности, ресурса пар трения. Например, расточка вкладышей подшипников скольжения по кривым, отличным от окружности, профилирование разнообразных спиральных каналов на рабочих поверхностях упорных пят, чем достигается существенное повышение их несущей способности и долговечности (рис. 3.1) [42, 50].



Фланкирование – уменьшение контактной концентрации напряжений и изнашивания, заключается в срезании металла перенапряженных участков контактирования. Например, фланкирование зубьев зубчатых колес заключается в срезании металла эвольвентного профиля у вершины зуба, чем уменьшаются удары при входе и выходе зубьев из зацепления (рис. 3.2).

Нефланкированная передача

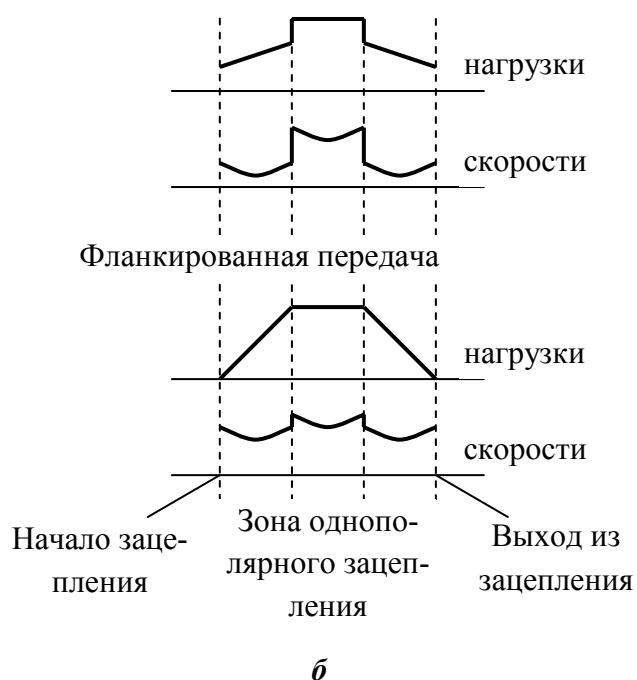
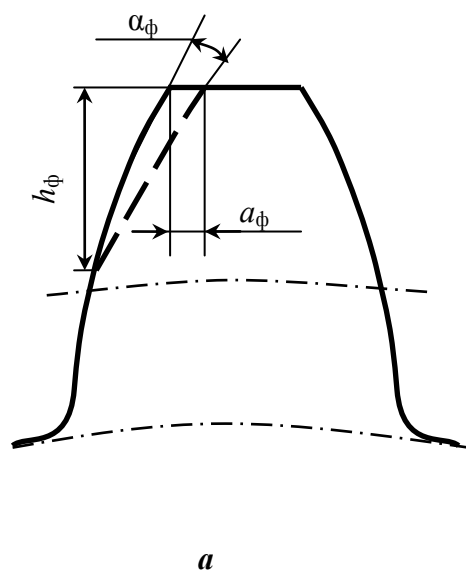


Рис. 3.2. Параметры фланкирования (a) и эпюры нагрузок и скоростей обычной и фланкированной передачи ($\bar{b}$)

1.3. Микропрофилирование поверхностей трения. Принципы, выбор метода

Микропрофилирование поверхностей трения – создание на поверхностях трения шероховатости, отвечающей триботехнологическому качеству, т. е. создание оптимального микрорельефа. Технологии микропрофилирования подразделяются на стохастические (приработка, притирка свободным абразивом, виброгалтовка) и программные (хонингование плосковершинное, суперфиниширование, вибрационное накатывание, алмазное выглаживание, упрочнение трением вращения и т. д.) [47, 53].

Дифференциальное микропрофилирование – создание качественно и количественно различного микрорельефа на различных участках одной и той же поверхности трения, в соответствии с необходимой маслосъемкостью. Достигается различными методами триботехнологии.

Хонингование

~ *алмазное плосковершинное* – один из методов улучшения триботехнологических свойств пар трения, процесс управления микрорельефом обрабатываемой поверхности: создание микропрофиля, состоящего из чередующихся относительно глубоких впадин (масляных карманов) и плоских выступов (плато), увеличивающих относительную опорную длину профиля. Микропрофиль поверхности формируется в процессе предварительного хонингования крупнозернистыми алмазными брусками на металлической связке и окончательного хонингования брусками как на эластичных так и на металлосиликатных связках. При этом относительная опорная длина профиля увеличивается от 1...10 % до 60...75 % (рис. 3.3).

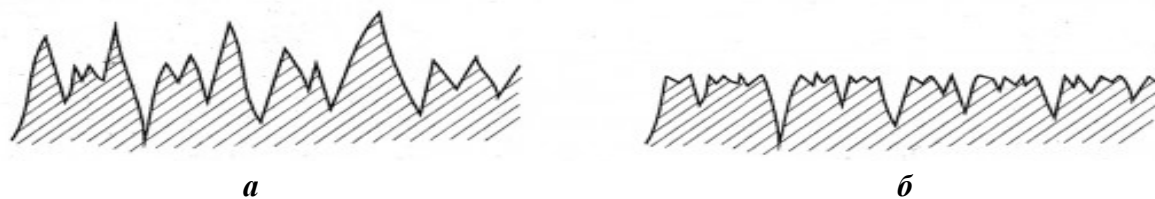


Рис. 3.3. Изменение микрорельефа после плосковершинного хонингования:
а – необработанная поверхность, *б* – после обработки

По сравнению с обычными методами хонингования имеет ряд преимуществ: сочетание относительно глубоких впадин для размещения смазочного материала и плоских «плато», воспринимающих основную нагрузку; увеличение относительной опорной поверхности профиля при достаточной маслосъем-

кости; сокращение периода приработки; повышение износостойкости; увеличение ресурса пары трения в целом.

~ *антифрикционно-деформационное* – технологическая операция улучшения триботехнологических свойств поверхностей трения, состоящая в предварительном хонинговании с последующей обработкой, которая включает закрепление частиц антифрикционных материалов на поверхности и пластической деформацией микронеровностей. Величина деформации микронеровностей должна обеспечивать требуемые параметры микрогеометрии поверхности, не превышать высоту шероховатого слоя исходного профиля и допустимых предельных значений для обрабатываемого материала. Обработка производится специальной хонинговальной головкой, содержащей твердосплавные деформирующие элементы и специальные антифрикционные бруски для насыщения поверхности твердыми смазочными материалами.

~ *антифрикционное плосковершинное* – один из методов улучшения триботехнологических свойств пар трения, состоит в обработке поверхности методом хонингования алмазного плосковершинного с нанесением на полученную поверхность прирабочного твердосмазочного покрытия натиранием специальными брусками. Брусок содержит в себе композиционный материал, включающий фазы, обладающие высоким химическим сродством к железу, низким коэффициентом трения, высокой пластичностью и антикоррозионными свойствами – графит, дисульфид молибдена с кремнийорганическим связующим, фторопласт с различными наполнителями (свинец, бронзы, оксид свинца, дисульфид молибдена), фторопласт, армированный углеродными волокнами, фторопласт, наполненный керамикой, и др. Результаты стендовых испытаний гильз цилиндров двигателей, обработанных данными методами, показали увеличение ресурса на 30...50 %.

Вибрационная обработка деталей (виброгалтовка). Механический или химико-механический процесс выглаживания и упрочнения поверхностей путем направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере, в которой расположены детали (лопатки турбин и компрессоров, зубчатые колеса, клапаны и др.) и рабочая среда (рис. 3.4). Интенсивность процесса зависит от скорости: относительного перемещения деталей и частиц рабочей среды, объема заполнения рабочей камеры, гранулометрического состава частиц, влагосодержания и других факторов. Виброгалтовка способна создавать оптимальные остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей. В зависимости от количества направлений приложения вибраций установки делятся на одно-, двух- или трех-

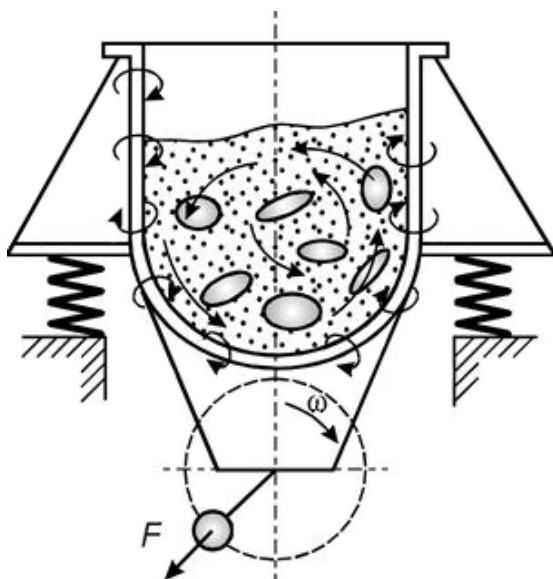


Рис. 3.4. Установка для виброгалтовки:
 F – возмущающая сила

компонентные. Объем рабочих камер виброустановки от 6 до 28000 л. Процесс обработки может протекать всухую, чаще всего с периодической и непрерывной подачей жидкого раствора, который обеспечивает удаление продуктов износа с поверхности деталей и частиц рабочей среды, смачивание деталей, равномерное распределение их в среде. В состав раствора могут вводиться различного рода химические добавки со специальными свойствами.

Вибрационное обкатывание (раскатывание). На обрабатываемой поверхности

шаром (при обработке металлов твердостью до 40 HRC) или алмазом (при обработке закаленных твердых сплавов) выдавливается канавка, все геометрические параметры которой (размер, форма, рисунок) являются функциями режима, рис. 3.5, *а*. Рельеф может представлять собой канавки – непересекающиеся, пересекающиеся не полностью, полностью пересекающиеся. К общим достоинствам метода относятся: получение заданных характеристик микрорельефа (радиусов закругления вершин неровностей r и впадин неровностей r' , угла наклона β образующих выступов неровностей; площади $F_{\text{оп}}$ опорной поверхности) в широких пределах; высокая степень однородности размеров и формы образующих неровностей; образование микрорельефов с радиусами закругления выступов и впадин, значительно большими, чем при точении и шлифовании.

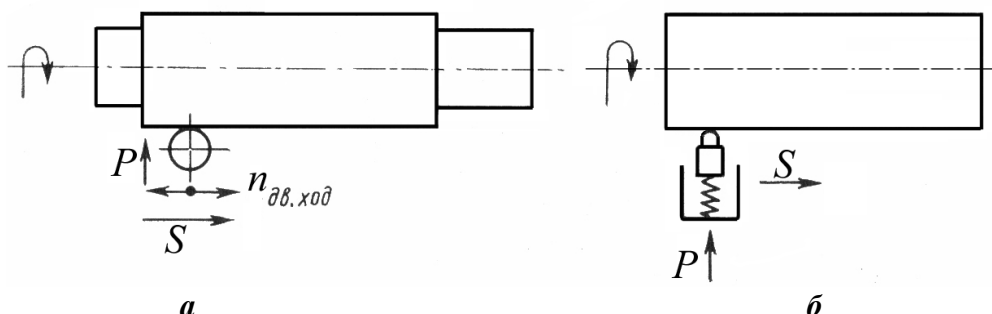


Рис. 3.5. Схемы виброобработки (*а*) и алмазного выглаживания (*б*):
 P – усилие прижима рабочего элемента, S – подача

Например, при круглом шлифовании неровности при шероховатости поверхности $Ra = 0,32$ мкм имеют $r = 30$ мкм, а при виброобработке соответ-

венно $r = 120...200$ мкм. Виброобработка дает возможность аналитического расчета опорной поверхности, маслостойкости, числа выступов и впадин на единицу площади и пр. Оптимизация микрорельефа с одновременным упрочнением наплавов рельефа повышает износостойкость, сопротивление схватыванию и ползучести, увеличивает гидроплотность, сопротивление коррозии.

Алмазное выглаживание – заключается в пластическом деформировании и выглаживании поверхностных слоев детали инструментом, рабочей частью которого является кристалл естественного алмаза массой 0,4...0,8 карат, ограниченный на сферу или цилиндр радиусом 1...3 мм, с шероховатостью $Ra = 0,02...0,01$ мкм (рис. 3.5, б). Исходная шероховатость – не ниже $Ra = 5...1,25$ мкм. Усилия прижима инструмента к детали составляют 0,5...3,0 МПа. С увеличением подачи шероховатость возрастает. Например, для стали 1Х18Н10Т высота неровностей Rz с изменением подачи от 0,05 до 0,15 мм/об увеличивается от 0,2 до 0,8 мкм, поэтому рабочий диапазон подачи находится в пределах 0,05...0,07 мм/об. С ростом усилия прижима от 1,0 до 3,0 МПа чистота поверхности повышается, а свыше 3,0 МПа – снижается из-за перенаклепа. Интенсивному наклепу подвергаются лишь самые верхние слои (10...20 мкм) поверхности. Микротвердость составляет 4...4,5 ГПа, а остаточные напряжения сжатия достигают 2 ГПа. Наибольшее влияние на глубину распространения остаточных напряжений оказывают усилия прижима и радиус сферы наконечника.

Упрочнение и выглаживание трением верчения. Этот метод служит для обработки нежестких деталей, когда большие усилия прижима неприемлемы (рис. 3.6).

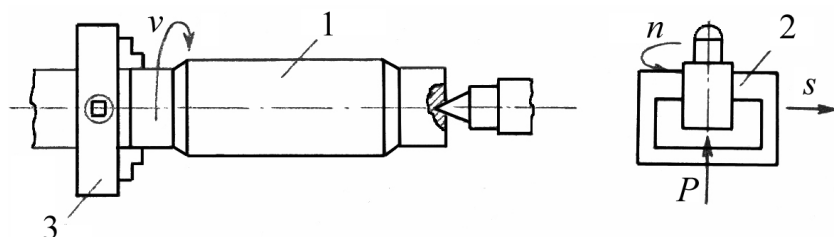


Рис. 3.6. Схема упрочнения и выглаживания трением верчения:
1 – деталь; 2 – упорный элемент; 3 – патрон токарного станка,
 P – усилие прижима рабочего элемента; S – подача

Процесс протекает значительно интенсивнее обычного выглаживания за счет большого выделения теплоты в месте контакта упорного элемента и детали при небольших радиальных усилиях прижима инструмента. Универсальная шлифовальная головка, устанавливаемая вместо верхней каретки суппорта токар-

ного станка, обеспечивает упрочнителю вращательное движение, а станок – поступательное движение. Рабочую часть упрочнителя, имеющую сферическую форму, выполняют из твердого сплава ВК8 с шероховатостью поверхности до $Ra = 0,32$ мкм. Оптимальные режимы упрочнения для конструкционных сталей: $P = 1,5$ МПа; частота вращения детали 30 об/мин; подача, 0,1 мм/об; частота вращения упрочнителя 3000 об/мин; охлаждение индустриальным маслом; один проход. При этих режимах шероховатость стабильно уменьшается на два-три класса при исходной шероховатости $Ra = 5...1,25$ мкм. Еще более высокие стабильные результаты получены при введении в смазку 5 % дисульфида молибдена – улучшение чистоты поверхности на 4...5 классов.

Максимальная микротвердость на поверхности составляет 3,5...4,5 ГПа, т. е. в 1,8...2 раза выше исходной. Глубина упрочненного слоя достигает 0,3 мм. Упрочнение и выглаживание трением вращения повышает износостойкость и усталостную прочность в 1,5...2 раза. Метод может быть использован также для создания регулярного микрорельефа.

ГЛАВА 2. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

2.1. Явления, происходящие в поверхностном слое при обработке деталей ППД

Упрочнение (наклеп) – изменение структуры и свойств металла, вызванное пластической деформацией. Происходит из-за накопления в металле части энергии деформации, которая расходуется на искажение кристаллич. решетки, образование преимущественно ориентированных кристаллов (текстур), изменение дислокац. структуры, а также на увеличение удельного объема металла в слое. Упрочнение может происходить в результате действия внешних деформирующих сил (т. н. деформационное) и в результате действия фазовых превращений (фазовое). При наклепе снижаются пластичность и ударная вязкость, увеличиваются твердость и предел текучести. При поверхностном наклепе изменяются остаточные напряжения и повышается усталостная прочность. Наклеп снижает сопротивление материала деформациям противоположного знака (эффект Баушингера). Наклепанный слой материала обладает фрикционно-износными характеристиками, отличными от характеристик исходного материала.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – один из видов упрочнения материалов. Различают статическое и динамическое ППД – накатывание и раскатывание роликами и шариками, дорнование, вибрационная и гидроабразивная обработка и т. п. ППД уменьшает шероховатость поверхности, обеспечивает наклеп и остаточные сжимающие напряжения, которые повышают усталостную прочность, износостойкость и долговечность изделий, особенно работающих в условиях знакопеременного нагружения. При изготовлении деталей применение ППД позволяет исключить операцию шлифования из технологического процесса.

Обработка ППД сопровождается сложными структурными и фазовыми превращениями. Происходит измельчение зерен металла, изменяется соотношение их размеров, образуется упорядоченная ориентированная структура волокнистого характера с анизотропными механическими свойствами, когда пластичность вдоль волокон выше, чем в поперечном направлении.

Основной причиной упрочнения является рост количества дефектов в поверхностном слое под воздействием пластических деформаций (рис. 3.7).

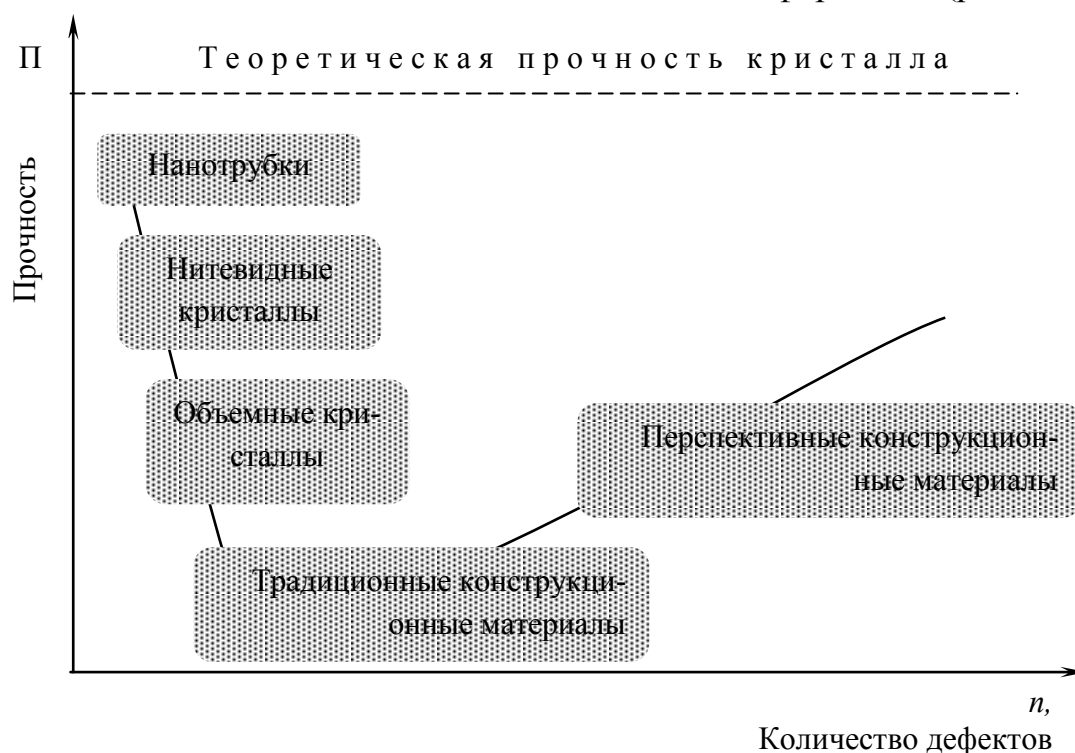


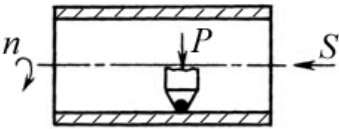
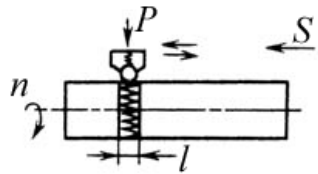
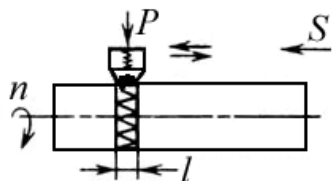
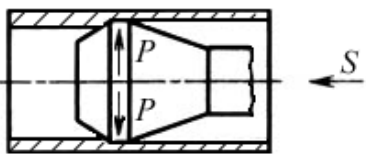
Рис. 3.7. Изменение прочности кристалла Π в зависимости от концентрации дефектов n :
ТП – теоретическая прочность

2.2. Методы выполнения ППД

Схемы различных видов пластического деформирования и области их рационального применения приведены в табл. 3.4, получаемые при этом параметры обработанного слоя – в табл. 3.5.

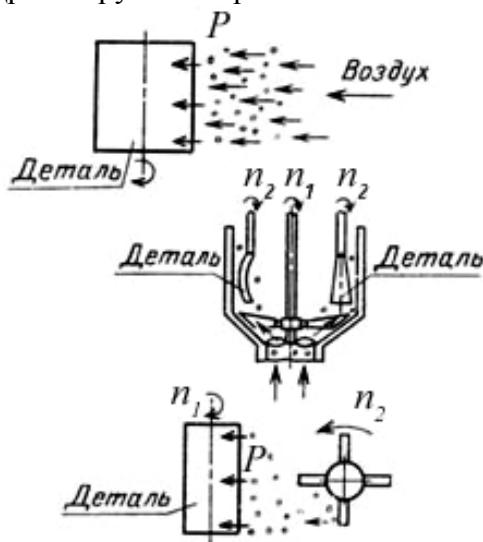
Таблица 3.4. Характеристика основных методов ППД и области их применения

Метод, эскиз	Сущность метода, обрабатываемые поверхности, оборудование, характер производства
Статические методы	
Упрочняющее раскатывание Упрочняющее обкатывание	Качение инструмента (ролик, шар) по обрабатываемой поверхности, для плоских и выпуклых поверхностей – обкатывание, для внутренних поверхностей – раскатывание. Поверхности тел вращения типа втулок, валов и плоские поверхности, твердостью до 45...55 HRC. Универсальное и специальное оборудование. Серийное и массовое производство.

Метод, эскиз	Сущность метода, обрабатываемые поверхности, оборудование, характер производства
Выглаживание 	Скольжение инструмента по локально контактирующей с ним поверхности. Поверхности тел вращения, до 70 HRC. Тонкостенные и неравножесткие детали. Универсальное оборудование. Единичное и серийное производство.
Вибрационное накатывание 	Накатывание или выглаживание при вибрации инструмента (шара, выглаживающего наконечника) по касательной к поверхности деформируемого металла. Поверхности тел вращения и плоские поверхности.
Вибрационное выглаживание 	Универсальное оборудование. Единичное и серийное производство.
Поверхностное дорнование 	Поступательное скольжение дорна по охватывающей его поверхности. Детали типа втулок и труб, твердостью до 40 HRC. Специальное или протяжное и пресовое оборудование. Серийное и массовое производство.

Ударные методы

Дробеструйная обработка



Дробеметная обработка

Гидродробеструйная обработка

Удары дроби по деформируемому металлу. Дробь – круглые тела из различных материалов. В зависимости от источника кинематической энергии (струя газа, жидкость, газ с жидкостью, вращение ротора (дробемета)) обработка называется гидродробеструйной, гидропневмодробеструйной, дробеметной и т.д. Поверхности различной конфигурации, твердостью до 55 HRC. Специальное оборудование. Серийное и массовое производство.

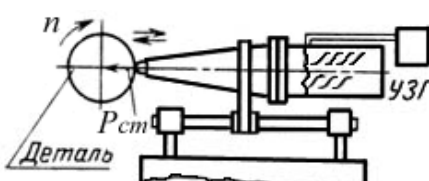
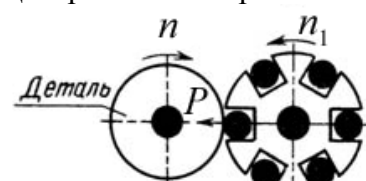
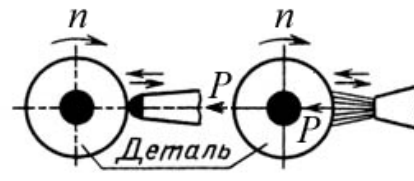
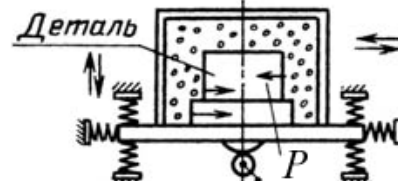
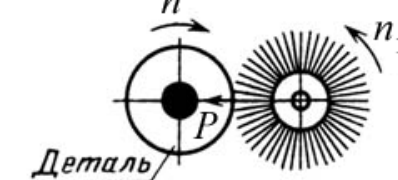
Метод, эскиз	Сущность метода, обрабатываемые поверхности, оборудование, характер производства
Ультразвуковая обработка 	К постоянной силе добавляется сила ударов ультразвуковых колебаний. Поверхности тел вращения. Универсальное оборудование, оснащенное ультразвуковым генератором и головкой. Единичное и серийное производство.
Ударное раскатывание 	Ролики создают удары в момент прохождения выступающих элементов опоры. Поверхности типа втулок и труб, твердостью до 50 HRC. Универсальное и специальное оборудование. Серийное и массовое производство.
Центробежная обработка 	Удары инструмента по обрабатываемой поверхности под действием центробежной силы. Поверхности тел вращения и плоские поверхности твердостью до 50 HRC. Универсальное оборудование. Серийное и массовое производство.
Упрочняющая чеканка 	Ударное приложение деформирующей силы при возвратно-поступательном перемещении инструмента. Поверхности тел вращения и плоские поверхности твердостью до 50 HRC. Универсальное и специальное оборудование. Единичное, серийное и массовое производство.
Вибрационная ударная обработка 	Удары рабочими телами (дробь) закрепленных деталей в замкнутом объеме при его вибрации. Поверхности различной конфигурации твердостью до 55 HRC. Специальное оборудование. Серийное и массовое производство
Обработка механической щеткой 	Удары концами проволоки вращающейся механической щетки. Поверхности различной конфигурации твердостью до 55 HRC. Универсальное и специальное оборудование. Единичное, серийное и массовое производство.

Таблица 3.5. Параметры обрабатываемого слоя при основных видах ППД

Вид ППД	Толщина упрочненно-го слоя, мм	Достижимая шероховатость, Ra , мкм
Обкатывание роликами и шариками	0,2...25	0,32
Обкатывание вибрирующим роликом	15...20	1,25
Динамический наклеп шариками и поверхностная чеканка	0,6...2,5	1,25...0,63
Дробеструйный наклеп	0,15...3	2,5...0,63

2.3. Электрогидравлическое упрочнение

Электрогидравлическое упрочнение – поверхностное упрочнение изделий посредством искрового разряда или теплового взрыва (см. *Электрогидравлический эффект*). Если не требуется высокого качества обработки, поверхность самого изделия используют как второй электрод. Подбором режимов можно создать такие условия обработки, когда следы отдельных электрогидравлических ударов перекрывают друг друга, что обеспечивает сплошность наклепа и сохранение гладкой поверхности изделия. Упрочнению или наклепу могут быть подвергнуты как плоские, так и сферические поверхности. Особенно перспективно применение электрогидравлического наклепа внутренних полостей различных изделий, который иными способами осуществить крайне сложно. Если поверхность изделия уже обработана с высокой точностью и повреждение его поверхности «ожогами» от наклепа недопустимо, упрочнение осуществляют методом теплового взрыва ВТЭ (ВТЭ – «взрывающийся тепловой элемент», тонкая проводящая проволока, лента или трубка, замыкающая электроды различных электрогидравлических устройств) непосредственно вблизи упрочняемой поверхности, защищенной тонким слоем какого-либо диэлектрика (см. рис. 3.8). Подобному наклепу могут подвергаться оси, валы, цапфы, внутренние и внешние поверхности, обоймы и шарики подшипников, полости цилиндров двигателей, направляющие станин и т. д.

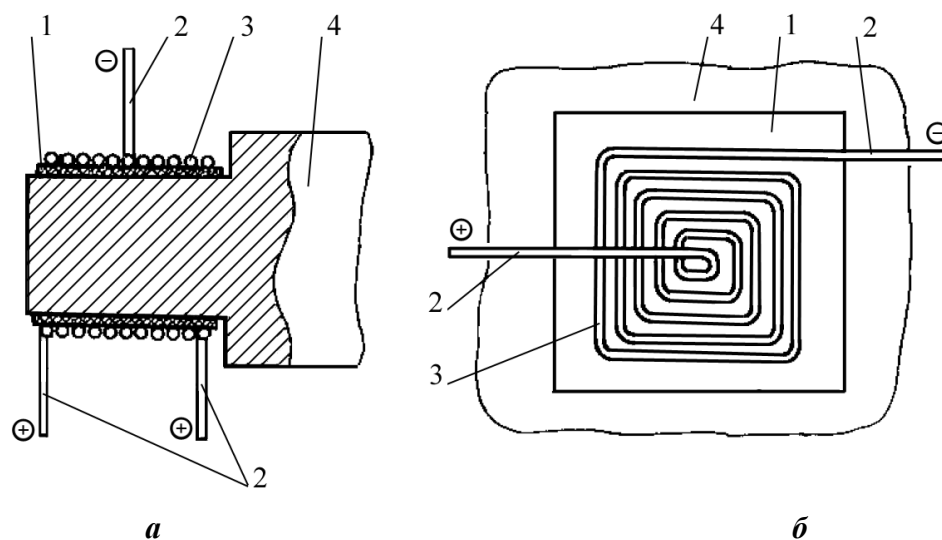


Рис. 3.8. Электрогидравлическое устройство для упрочнения поверхностей тепловым взрывом:
а – цилиндрической поверхности; *б* – плоской поверхности; 1 – диэлектрическая прокладка; 2 – токопроводы к ВТЭ, 3 – проволочный ВТЭ, 4 – упрочняемое изделие

Электрогидравлический эффект – возникновение высокого давления в результате высоковольтного электрического разряда между погруженными в жидкость электродами. Давление получают за счет энергии импульсной ударной волны, распространяющейся вокруг канала разряда в рабочей среде (обычно в воде). Используют для механического воздействия на материалы при их обработке (например, прессовании, штамповке, гибке), для поверхностного упрочнения, при очистке, дроблении, размоле, перемешивании, а также для получения коллоидных растворов, эмульсий, суспензий, для импульсной подачи жидкости под высоким давлением и т. д.

ГЛАВА 3. ТЕРМИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

3.1. Термическая обработка

Термическая обработка – изменение структуры, а, следовательно, и свойств металлов и сплавов при нагреве до заданной температуры, выдержке при этой температуре и охлаждении с заданной скоростью. Может быть как промежуточной операцией, предназначенной для улучшения технологических свойств (облегченияковки, штамповки, резания), так и окончательной – для обеспечения в материале или изделиях требуемого комплекса свойств. Термическая обработка применяется, главным образом, для образования твердого износостойкого слоя на определенных участках деталей, изготовленных из средне- и высокоуглеродистых сталей, а так же из перлитного, ковкого, серого и высокопрочного чугунов с содержанием не менее 0,6 % связанного углерода, может быть использована для обработки других материалов, которые испытывают фазовые превращения в твердом состоянии.

Термическая обработка металлов подразделяется на:

- собственно термическую, заключающуюся только в тепловом воздействии на металл,
- химико-термическую, сочетающую тепловое и химическое воздействия,
- термомеханическую, сочетающую тепловое воздействие и пластическую деформацию.

Диаграмма (рис. 3.9) показывает фазовый состав и структуру сплавов с различной концентрацией углерода.

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода (0,008 % при комнатной температуре) и других примесей в α -Fe. Решетка объемно-центрированная кубическая (ОЦК). Мягкая, пластичная, непрочная структурная составляющая. Механические свойства аналогичны чистому железу, твердость 100 НВ.

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в γ -Fe переменной концентрации. В углеродистых сталях и чугунах устойчив выше 723°C. Введение специальных добавок (никеля, марганца и др.) позволяет получать аусте-

нит, устойчивый при комнатных температурах (аустенитная сталь). Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК). Немагнитен, обладает высокой пластичностью ($\delta = 40 \dots 50 \%$), сравнительно низким пределом текучести и прочности, твердость $160 \dots 180 \text{ НВ}$.

Цементит (Ц) – химическое соединение карбид железа Fe_3C , содержит 6,67 % углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую решетку. Отличается

большой твердостью (НВ более 800, т. е. примерно в 10 раз тверже феррита) и значительной хрупкостью (цементит имеет чрезвычайно низкую, практически нулевую пластичность); $t_{\text{пл}} = 1250^\circ\text{C}$.

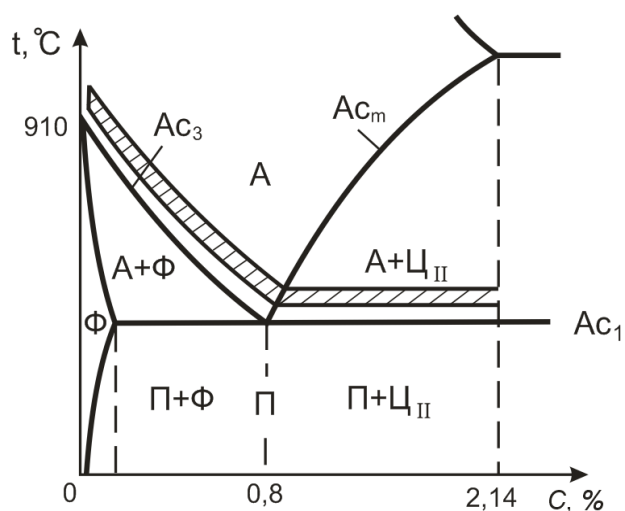


Рис. 3.9. Фрагмент диаграммы состояния «железо-цементит»

Мартенсит – пересыщенный упорядоченный твердый раствор углерода и легирующих элементов в α -Fe, получается в результате закалки из аустенита. В результате мартенситного сдвига объемно-центрированная решетка α -Fe пре-

вращается из кубической в тетрагональную. Ее искажения около внедренных атомов вызывают упрочнение. Тетрагональность и упрочнение растут с концентрацией углерода (твердость до 1000 НВ). Концентрация углерода в твердом растворе и субзернистая структура мартенсита изменяется при отпуске, используемом для повышения пластичности стали.

Перлит (от фр. *perle* – жемчужина) – одна из структурных составляющих железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов. Представляет собой эвтектоидную смесь двух фаз – феррита и цементита (в легированных сталях – карбидов легирующих элементов). Продукт эвтектоидного распада (перлитного превращения) аустенита при сравнительно медленном охлаждении железоуглеродистых сплавов ниже 727°C . При этом γ -Fe переходит в α -Fe, растворимость углерода в котором составляет от 0,006 до 0,025 %; избыточный углерод выделяется в форме цементита или карбидов.

Дисперсные разновидности перлита называют сорбитом и трооститом.

3.1.1. Виды термической обработки

Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах (представляется в виде графика в осях «температура – время», рис. 3.10).

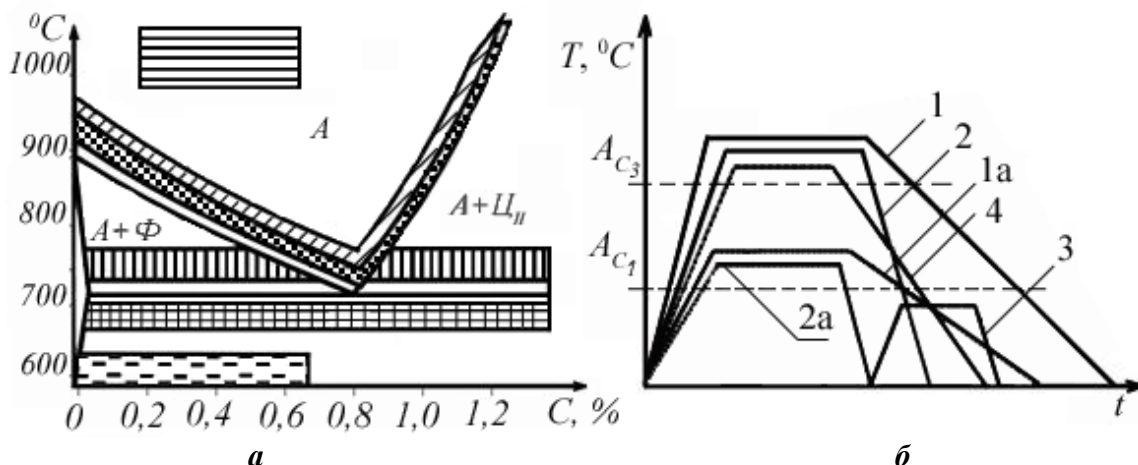


Рис. 3.10. Фрагмент диаграммы состояния Fe – Fe₃C и температурные области нагрева (а) и схема режимов термообработки сталей (б) при термической обработке сталей:



Отжиг I рода в зависимости от исходного состояния стали и температуры его выполнения может включать процессы гомогенизации, рекристаллизации и снятия остаточных напряжений. Особенность этого вида отжига в том, что указанные процессы происходят независимо от того, протекают ли в сплавах при этой обработке фазовые превращения или нет. Поэтому отжиг I рода можно проводить при температурах выше или ниже температур фазовых превращений. Отжиг I рода уменьшает в определенной степени химическую или физическую неоднородность, созданную предшествующими обработками.

Гомогенизация (диффузионный отжиг) – применяют для слитков легированной стали с целью уменьшения дендритной или внутрикристаллитной ликвации, способствует более благоприятному распределению некоторых неметаллических включений вследствие частичного растворения и коагуляции. Понижает пластичность и вязкость легированной стали. Температура зависит от состава стали, обычно в пределах 1100...1200 °С.

Рекристаллизационный отжиг – нагрев холоднодеформированной стали выше температуры рекристаллизации, выдержка при этой температуре с последующим охлаждением. Устраняет наклеп и повышает пластичность. Применяют перед холодной обработкой давлением и как промежуточную операцию для снятия наклепа между операциями холодного деформирования. В некоторых случаях рекристаллизационный отжиг используют и в качестве окончательной термической обработки. Температура рекристаллизационного отжига стали зависит от ее состава и обычно находится в пределах 650...760 °С.

Отжиг для снятия остаточных напряжений применяют для отливок, сварных изделий, деталей после обработки резанием и др., в которых в процессе предшествующих технологических операций из-за неравномерного охлаждения, неоднородной пластической деформации и т. п. возникли остаточные напряжения. Отжиг стальных изделий для снятия напряжений проводят при 160...700 °С с последующим медленным охлаждением, для снятия сварочных напряжений – при 650...700 °С.

Отжиг II рода заключается в нагреве стали до температур выше точек A_{c3} или A_{c1} выдержке и последующем медленном охлаждении, в результате которого протекающие фазовые превращения приближают сталь к практически равновесному структурному состоянию: феррит + перлит в доэвтектоидных сталях; перлит в эвтектоидной стали, перлит + вторичный цементит в заэвтектоидных сталях. После отжига II рода сталь обладает низкой твердостью и прочностью при достаточной пластичности. Фазовая перекристаллизация, происходящая при отжиге, измельчает зерно и устраняет строчечность, улучшает обработку резанием средне- и высокоуглеродистой стали, способствует повышению пластичности и вязкости по сравнению с полученными после литья,ковки и прокатки. Для многих крупных отливок является окончательной термической обработкой, так как при этом в изделиях практически отсутствуют остаточные напряжения и их деформация оказывается минимальной. Виды отжига II рода: полный, изотермический, неполный, сфероидизирующий и низкий.

Полный отжиг заключается в нагреве доэвтектоидной стали на 30...50 °С выше температуры, соответствующей точке A_{c3} , выдержке при этой температуре для полного прогрева и завершения фазовых превращений в объеме металла и последующем медленном охлаждении. Происходит полная фазовая рекристаллизация стали. Образуется аустенит с мелким зерном, при охлаждении возникает мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость и пластичность и получение высоких свойств после окончательной термической

обработки. Полному отжигу подвергают сортовой прокат, поковки и фасонные отливки.

Изотермический отжиг – сталь, обычно легированную, нагревают до точки $[Ac_3 + (50...70\text{ }^{\circ}\text{C})]$ и сравнительно быстро охлаждают до температуры $[Ac_1 - (50...150\text{ }^{\circ}\text{C})]$, выдерживают для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе. И. о. обеспечивает более однородную структуру, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается, превращение по всему объему стали происходит при одинаковой степени переохлаждения. Изотермическому отжигу подвергают штамповки, заготовки инструмента и других изделий небольших размеров.

Закалка – вид термической обработки, состоящий в нагреве стали выше критической точки, выдержке и последующем охлаждении с высокой скоростью (в воде, масле, водных растворах солей и пр.). При переохлаждении аустенита происходит его бездиффузионное превращение (подвижность атомов углерода близка к нулю). При этом меняется тип решетки $\gamma\text{-Fe(C)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(C)}$, а весь углерод, ранее растворенный в решетке аустенита, остается в решетке феррита. Образуется *мартенсит* – перенасыщенный твердый раствор внедрения углерода в $\alpha\text{-Fe}$. Из-за перенасыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажена и, вместо кубической, приобретает тетрагональную форму (рис. 3.11). Сталь переходит в состояние наибольшей возможной твердости (45...60 HRC).

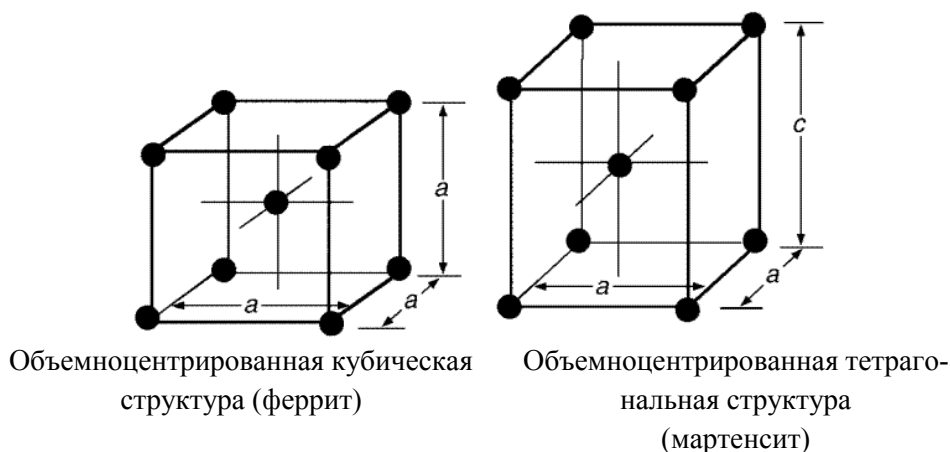


Рис. 3.11. Сравнение кристаллических структур феррита и мартенсита

Температура нагрева при закалке зависит в основном от химического состава стали. Для доэвтектоидных сталей она составляет $[Ac_3 + (30...50\text{ }^{\circ}\text{C})]$. В этом случае сталь имеет структуру однородного аустенита, который при последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую скорость закалки, превращается в мартенсит. Такая закалка называется *полной*. Если же

при нагреве в структуре мартенсита сохраняется некоторое количество феррита, снижающего твердость закаленной стали, закалка называется **неполной**.

Для заэвтектоидной стали наилучшая температура закалки $[A_{c1} + (20...30\text{ }^{\circ}\text{C})]$, т. е. закалка неполная. В этом случае сохранение цементита при нагреве и охлаждении будет способствовать повышению твердости, так как твердость цементита больше твердости мартенсита. Нагревать заэвтектоидную сталь до температуры выше A_{c1} не следует, так как твердость получается меньшей за счет растворения цементита и увеличения количества остаточного аустенита.

Инструментальную сталь подвергают закалке и отпуску для повышения твердости, износостойкости и прочности, а конструкционную сталь — для повышения прочности, твердости, износостойкости, получения достаточно высокой пластичности и вязкости. Закалка обычно не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки подвергают отпуску.

Охлаждающие жидкости. Закалку углеродистых сталей проводят чаще в воде, легированных — в масле или других средах. Вода как охлаждающая среда имеет некоторые существенные недостатки: высокая скорость охлаждения в области температур мартенситного превращения нередко приводит к образованию закалочных дефектов; с повышением температуры резко ухудшается закалочная способность. При температуре воды $80...90\text{ }^{\circ}\text{C}$ пленочное кипение распространяется на большую область температур и занимает до 95 % всего периода охлаждения. Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 8...12 %-ные водные растворы NaCl и NaOH, которые хорошо зарекомендовали себя на практике.

Масло как закалочная среда имеет ряд преимуществ: небольшую скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, что уменьшает возникновение закалочных дефектов, постоянство закаливающей способности в широком интервале температур среды ($20...150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Перепад температур между поверхностью и сердцевиной изделия при закалке в масле меньше, чем при охлаждении в воде. К недостаткам следует отнести повышенную воспламеняемость (температура вспышки $160...300\text{ }^{\circ}\text{C}$), недостаточную стабильность и низкую охлаждающую способность в области температур перлитного превращения, образование пригара на поверхности изделий, а также повышенную стоимость.

Обычная закалка – осуществляется при непрерывном охлаждении изделия в одной охлаждающей среде от температуры аустенитного превращения до температуры окружающей среды. Наиболее широко используемый метод, однако при этом возникают наибольшие остаточные напряжения. Модификацией этого метода является *частичная закалка*, состоящая в закалке части изделия или путем нагрева всего изделия и охлаждения только его закаливаемой части, или нагревом его закаливаемой части и охлаждением целого изделия.

Ступенчатая закалка – состоит в охлаждении изделия с изотермической выдержкой. Охлаждение изделия от температуры аустенизации происходит путем его погружения в соляной раствор, нагретый на 20...40 °С выше начала мартенситного превращения, которое существенно зависит от содержания углерода в сталях. Выдержка позволяет выровнять температуру в сечении. После извлечения изделия из ванны его охлаждают до нормальной температуры, чаще всего на воздухе.

Изотермическая закалка состоит в охлаждении изделия в среде с температурой выше начала мартенситных превращений M_n с изотермической выдержкой до полного или неполного превращения аустенита и последующим охлаждением для получения тонкопластинчатой структуры бейнита или бейнита с мартенситом. Цель – получение минимальных внутренних напряжений, минимальных деформаций и высокой вязкости.

Закалка с самоотпуском. Охлаждение изделия в закалочной среде прерывают с тем, чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество тепла. Под действием теплообмена температура в более сильно охладившихся поверхностных слоях повышается и сравнивается с температурой сердцевины – происходит отпуск поверхности стали (т. н. самоотпуск). Образующиеся структуры – мартенсит отпуска или структуры продуктов распада мартенсита. Сердцевина имеет более низкую твердость, чем поверхностные слои.

Закалка объемная – это закалка, при которой происходит нагрев и превращения по всей массе (объему) изделия.

Закалка поверхностная – это закалка, при которой происходит нагрев и превращения в поверхностном слое изделия.

Закалка токами высокой частоты. Используется явление индукции и поверхностного распределения индуцированного тока в детали, который и вызывает ее нагрев. Обеспечивает высокие скорости нагрева (50...500 °С/с, при обычном печном нагреве до 1...3 °С/с). Большие скорости нагрева приводят к тому, что превращение перлита в аустенит смещается в область более высоких

температур. После закалки изделия подвергают низкому отпуску при 160...200 °С, нередко самоотпуску. Детали имеют высокую твердость (50...60 HRC), сопротивляемость износу, не склонны к хрупкому разрушению, значительно повышается предел выносливости.

Плазменная закалка. Нагрев поверхности осуществляется плазмой в виде электронного, ионного или электронно-ионного пучка, направленного на поверхность, что вызывает ее краткосрочный скоростной нагрев до температуры выше температуры мартенситного превращения. Толщина упрочненного слоя находится в пределах 0,01...2,5 мм, твердость 55...64 HRC и 800...1200 HV, а для борированных сталей – до 1800 HV. Охлаждение осуществляется водой через спрейер, защита инертным газом исключает окисление и обезуглероживание поверхности.

Лазерная закалка – фазовое превращение материала после скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны. Используются технологические лазеры импульсного и непрерывного действия. При импульсном излучении воздействие осуществляется в точке, при непрерывном – в полосе шириной до 3 мм. Глубина упрочненного слоя на CO₂-лазере составляет от 0,3 до 0,1 мм, а на импульсном лазере – 0,1...0,15 мм. Применяется для упрочнения сталей: инструментальных для холодной обработки, быстрорежущих, конструкционных, низкоуглеродистых с содержанием углерода ниже 0,2 %, среднеуглеродистых, легированных, коррозионностойких, подшипниковых, а также для упрочнения чугунов (в частности, серого) и медных сплавов. Практически не влияет на предел прочности и предел текучести сталей.

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1}, выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. В результате сталь получает требуемые механические свойства, кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Различают следующие три вида отпуска.

Низкотемпературный (низкий) отпуск (около 250 °С, 1...2,5 ч). Снижаются закалочные макронапряжения, мартенсит закалки переводится в мартенсит отпуска, повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь сохраняет твердость в пределах 58...63 HRC, а, следовательно, высокую износостойкость. Низкотемпературно-

му отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, после поверхностной закалки, цементации, цианирования или нитроцементации.

Среднетемпературный (средний) отпуск выполняют при 350...500 °С, применяют главным образом для пружин и рессор, штампов. Обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости и релаксационную стойкость. Структура стали после среднего отпуска – троостит отпуска или троостомартенсит; твердость стали 40...50 HRC.

Высокотемпературный (высокий) отпуск производят при 500...680 °С. Структура стали – сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Улучшение – комбинированная обработка, включающая закалку с высоким отпуском. Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3...0,5 % С) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу развития трещин и снижая температуру порога хладноломкости. Однако износостойкость улучшенной стали вследствие ее пониженной твердости невысокая.

Нормализация – заключается в нагреве стали до температур $[A_{c3} + 50 \text{ °C}]$, непродолжительной выдержке для прогрева сечки и завершения фазовых превращений и охлаждении на воздухе. Обеспечивает получение мелкозернистой структуры, выравнивание структурной неоднородности (в поковках, отливках или деталях после цементации), улучшение обрабатываемости резанием (для низкоуглеродистой стали), повышение твердости и механических свойств, устранение наклепа после обработки резанием и подготовка структуры к последующей термообработке (закалке). Нормализация устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье или прокатке, ковке или штамповке, что на 10...15 % повышает прочность и твердость нормализованной средне- и высокоуглеродистой стали по сравнению с отожженной. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. Нормализация обеспечивает большую производительность при обработке резанием и получение более чистой поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. Механические свойства в этом случае будут ниже, но изделия будут подвергнуты

меньшей деформации по сравнению с получаемой при закалке, и вероятность появления трещин практически исключается.

Дифференциальная термообработка – обеспечивает заданную переменную твердость на определенной поверхности или ее части детали, осуществляется одним из следующих методов:

1. Полный нагрев детали и закалка с предохранением отдельных мест детали от охлаждения специальными патронами или струйчатая (масло, вода, раствор NaOH) закалка с подачей жидкости только на закаливаемые места. После закалки следует отпуск всей детали.

2. Местный нагрев детали выше точки A_{c3} пропусканием тока промышленной частоты (метод сопротивления) или в соляной или свинцовой ванне и последующая закалка нагретой части.

3. Обычная полная закалка всей детали и местный отпуск в свинцовой ванне, соляной ванне, в специальных печах или током промышленной частоты.

Термомеханическая обработка металлов – вид обработки металлов, объединяющий операции пластической деформации, нагрева и охлаждения с целью формирования окончательной структуры и свойств сплава, за счет повышенного числа несовершенств кристаллов, созданных пластической деформацией. Различают высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку. ВТМО состоит в горячей обработке давлением в области температур устойчивости аустенита с быстрым охлаждением для предотвращения его рекристаллизации. НТМО стали состоит в деформации в области температур неустойчивости аустенита (ниже 723°C). Из такого аустенита при последующей закалке получается мартенсит с особым строением, обеспечивающим очень высокий предел прочности – до 3 ГПа и более.

Обработка холодом – охлаждение стальных изделий (после предварительной закалки или закалки с отпуском) до температур обычно $-60\ldots-80^{\circ}\text{C}$, выдержка при этой температуре для охлаждения по всему сечению изделия и последующее извлечение из холодильника с самонагревом до комнатной температуры. Во время охлаждения в закаленной стали возобновляется мартенситное превращение. Обработка холодом уменьшает количество остаточного аустенита для повышения твердости и износоустойчивости изделий из высоколегированной стали, содержащей после цементации, закалки и низкотемпературного отпуска в поверхностном цементированном слое значительные количества остаточного аустенита. После обработки холодом деталей (например, из

стали 18ХНМА, 20Х2Н4А и 12Х2Н4А) обязательной операцией является низкотемпературный отпуск при 170...200 °С для снятия внутренних напряжений.

3.2. Химико-термическая обработка

Химико-термическая обработка – тепловая обработка металлов в химически активной среде с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя изделия. При этом происходит поверхностное насыщение металлического материала соответствующим элементом путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре.

Основные стадии ХТО:

- 1) образование активных атомов в насыщающей среде и перемещение их к поверхности обрабатываемого металла;
- 2) адсорбция образовавшихся активных атомов поверхностью насыщения;
- 3) диффузия – перемещение адсорбционных атомов от поверхности вглубь изделия.

Адсорбция – сложный процесс, протекающий на поверхности насыщения нестационарным образом. Различают физическую (обратимую) адсорбцию и химическую адсорбцию (хемосорбцию). При химико-термической обработке эти типы адсорбции накладываются друг на друга. Физическая адсорбция приводит к сцеплению адсорбированных атомов насыщающего элемента с обрабатываемой поверхностью благодаря действию сил Ван-дер-Ваальса, для нее характерна легкая обратимость процесса. При хемосорбции происходит взаимодействие между атомами насыщающей и поглощающей сред, которое по своему характеру и силе близко к химическому.

Диффузия – перемещение адсорбированных атомов в решетке обрабатываемого металла. Процесс диффузии возможен только при наличии растворимости диффундирующего элемента в обрабатываемом материале и достаточно высокой температуре, обеспечивающей энергию, необходимую для протекания процесса. Толщина диффузионного слоя зависит от нескольких факторов (температура насыщения, продолжительность процесса, состав металла или сплава, градиент концентраций насыщаемого элемента и др.).

3.2.1. Виды химико-термической обработки

Цементация (науглероживание) – химико-термическая обработка, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали угле-

родом путем длительного нагрева до 900...950 °С в углеродосодержащей среде (карбюризаторе) с последующей закалкой и низким отпуском. В качестве карбюризаторов применяют твердые, газовые смеси и солевые ванны. Цементация повышает твердость, износостойкость, усталостную и контактную выносливость. В результате цементации получают упрочненные слои твердостью до 64...66 HRC, сердцевина остается сравнительно мягкой (30...45 HRC). За эффективную толщину принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины доэвтектоидной зоны слоя, она обычно составляет 0,5...1,8 мм (в исключительных случаях до 6 мм). Цементации подвергают низкоуглеродистые (0,1...0,18 % С), чаще легированные стали (15Х, 18ХГТ, 20ХНМ, и др.). Детали поступают на цементацию после механической обработки с припуском на шлифование (50...100 мкм). Если цементации подвергают только часть детали, то участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем малопористой меди (0,02...0,05 мм), которую наносят электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками.

Газовая цементация проводится в методических, шахтных или камерных печах. В качестве рабочей среды используются экзо-эндогаз (20 % СО, 20 % Н₂, 60 % N₂ + 0,5...5 % СН₄), газы получаемые из керосина, синтина, различных спиртов, карбофлюида, смеси этанола и металлацетата, ацетона и пропана и т. д. Метод позволяет получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса, обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процесса, значительно упрощается последующая термическая обработка деталей, так как закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи. Окончательные свойства цементированные изделия приобретают в результате термической обработки после цементации. Твердость на поверхности цементированного слоя находится в пределах 58...62 HRC и в сердцевине 30...45 HRC. При цементации чаще контролируют не общую, а эффективную толщину слоя. Эффективная толщина соответствует зоне слоя от поверхности насыщения до границы зоны с твердостью 50 HRC или 550 НV. Толщина эффективного слоя составляет 0,4...1,8 мм.

Вакуумная цементация – высокотемпературная двухступенчатая цементации (с высоким углеродным потенциалом на первом этапе) при давлении ниже атмосферного. Проводится при 1000...1100 °С, в печь подается только очищенный природный газ (СН₄), реже пропан или бутан. Во время а к т и в н о г о п е р и о д а в печь подают насыщенный газ до создания оптимального давления $1,3 \cdot 10^4 \dots 3,9 \cdot 10^4$ Па. В этот период концентрация углерода на поверхности

достигает величины, близкой к пределу его растворимости в аустените при данной температуре. В д и ф ф у з и о н н ы й п е р и о д прекращают подачу газа в камеру и печь вакуумируют. В процессе выдержки при температуре насыщения происходит диффузия углерода вглубь, а концентрация его поверхности достигает оптимальной (0,8...1,0 %).

Ионная цементация. Основными процессами являются катодное распыление, т. е. удаление атомов с поверхности катода за счет бомбардировки его ионами газа, и диффузионное насыщение поверхностных слоев различными элементами (С, N, В и др.).

Цементация в кипящем слое. Проводится в «кипящем слое» в атмосфере эндогаза с добавкой метана. Кипящий слой представляет собой гетерогенную систему, в которой за счет проходящего потока газа через слои мелких (0,05...0,20 мм) частиц (чаще корунда) создается их интенсивное перемешивание. Большая скорость нагрева и высокий коэффициент массоотдачи углерода сокращают длительность процесса; деформация и коробление обрабатываемых деталей уменьшаются за счет равномерного распределения температуры по всему объему печи.

Жидкостная цементация. Науглероживание поверхности осуществляется в расплавленных солях, состоящих из карбонатов щелочных металлов Me_2CO_3 и карбида кремния SiC. Возможна цементация при электролизе расплавленных карбонатов щелочных или щелочноземельных металлов с добавками галогенидов. В качестве анода применяют графит или карборунд. Процесс ведут при 950 °С, скорость 0,5...0,8 мм/ч.

Азотирование (азотация, нитрирование) – вид химико-термической обработки, основанный на диффузионном насыщении азотом поверхностного слоя изделий. Азотированию подвергаются некоторые марки легированных сталей (аустенитные, нержавеющие, инструментальные, жаропрочные – 38ХМЮА, 38ХВФЮА, 30Х2Н2ВФА, 40ХНВА, 40ХНМА, 20Х3МВФ, 25Х5МА, 1Х13, 3Х13, 15Х11МФ, 4Х14Н14В2М, 1Х18Н9Т, Х12Ф, 4ХВ2С, 40Х и др.), легированные чугуны, титановые сплавы. Азотирование стали проводят в среде аммиака, а также в расплаве солей на основе карбамида и цианата (жидкостное азотирование) при температуре 500...650 °С в течение 30...60 ч. Толщина слоя от 0,1...0,5 (до 0,8 мм при многоступенчатом процессе). В результате азотирования повышаются твердость (до 1200 НВ), износостойкость, коррозионная стойкость (на воздухе и в воде), сопротивление усталости. Снижается влияние поверхностных дефектов на предел выносливости. Повышает-

ся сопротивление задирам и налипанию металла под нагрузкой, особенно при повышенных температурах. Во избежание продавливания тонкого твердого слоя подвергаемые азотированию стали предварительно упрочняют в объеме методами улучшения, нормализации до 32...37 HRC. Применяют в промышленности, в т. ч. для деталей, работающих при повышенных температурах (гильзы цилиндров, коленчатые валы, детали топливной аппаратуры двигателей, зубчатые колеса). Недостатки азотирования – длительность процесса и возможная хрупкость слоя (образование ϵ -фазы). При азотировании происходит небольшое увеличение размеров, коробление тонких и несимметричных деталей.

Ионное азотирование – обработка ионизированным азотом в плазме тлеющего разряда. В разреженной азотсодержащей атмосфере между катодом-деталью и анодом возбуждается разряд, и ионы азота, бомбардируя поверхность катода, нагревают ее до температуры насыщения. Вначале азотируемая поверхность очищается катодным распылением в разреженном азотсодержащем газе или водороде, поверхность при этом нагревается до температуры не более 200 °С. На рабочем режиме поверхность разогревается до требуемой температуры (450...580 °С) в результате бомбардировки положительными ионами газа. Продолжительность процесса составляет от нескольких минут до 24 часов. Ионное азотирование позволяет оптимизировать диффузионные слои по структуре и фазовому составу, варьируя параметры режима обработки. Применяется для обработки нитраллоев, инструментальных, мартенситно-стабилизирующих сталей, коррозионностойких, хромистых и хромоникелевых сталей, чугунов титановых сплавов и т. д.

Каталитическое газовое азотирование – одна из модификаций технологии газового азотирования. Средой для насыщения является аммиак, диссоциированный при температуре 400...600 °С на встроенном катализаторе непосредственно в рабочем пространстве печи (шахтной, ретортной или камерной) с кислородными зондами для определения насыщающей способности атмосферы. В целом при каталитическом азотировании применяют более низкие температуры, чем при газовом, также сокращается время обработки.

В таблице 3.6 приведены основные характеристики наиболее распространенных видов цементации и азотирования [27]

Таблица 3.6. Основные показатели различных способов цементации и азотирования

Наименование показателей	Технологический процесс					
	Цементация			Азотирование		
	Газовая (шахтная печь)	Жидкостная (соляная ванна)	Печь кипящего слоя	Традиционное	Ионное	Каталитическое
Оборудование				Электрическая муфельная печь	Установка «АР-63»	«Нитротек Турбо»
Толщина слоя, мм	0,6	0,6	0,5...0,6	0,3...0,4	0,5...1	до 1,2
Длительность процесса, ч	5	1,5...3	1	до 50	до 24	до 12
Максимальная температура, °С	900	900	1250	600	450	700
Микротвердость слоя, HV	540...600	550	1000	1200	1050	1050
Продуктивность, кг/ч	120	200	300	24	22	50
Установленная мощность, кВт	88	120	100	100	18	60
Садка, кг	600	300	300	1200	520	600
Коэффициент удельных энергозатрат	0,73	0,6	0,33	1	0,5	0,25
Степень токсичности процесса	средняя	средняя	низкая	высокая	очень низкая	низкая
Приблизительная стоимость оборудования, долл. США	35000	19000	17000	20000	150000	32000
Дополнительные операции	Закалка, отпуск	Закалка, отпуск	Закалка, отпуск	Обезжиривание	Ультразвуковая мойка	Нет
Автоматизация технологического процесса	–	–	полная механизация и автоматизация	–	компьютерное управление	автоматизировано
Затраты газа на 1 кг садки, м³/кг	0,0027	–	0,0017	0,0022	0,00006	0,001
Рабочие газы	природный газ, пропан или бутан; азот, водород, метан	–	пропан, бутан	аммиак, азот, аргон	водород, азот, аргон	аммиак, азот, кислород

Наименование показателей	Технологический процесс			
	Цементация		Азотирование	
			Традиционное	Ионное
Дополнительные данные			Технология позволяет проводить в одном рабочем объеме до 9 операций термической и химико-термической обработок	Возможность использования в качестве финишной обработки (сохраняется шероховатость до верхностей до $Ra = 0,63 \dots 1,2$ мкм)
				Подготовка печной атмосферы путем обработки аммиака на специальном катализаторе непосредственно в печном объеме

Нитроцементация – химико-термическая обработка стали или чугуна, состоящая в диффузионном насыщении поверхности металла одновременно азотом и углеродом при 700...950 °С в газовой, жидкой (цианирование) или твердой средах. Для нитроцементации легированных сталей используют контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5...5,5 % природного газа и 1,0...3,5 % аммиака (в объемных долях). После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже – после повторного нагрева. После закалки проводят отпуск при 160...180 °С. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска – 58...60 HRC, 570...690 HV. Толщина нитроцементированного слоя составляет 0,2...0,8 мм. Нитроцементация повышает твердость и износостойкость стальных изделий, коррозионную стойкость, усталостную и контактную прочность металла. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной формы, например зубчатые колеса.

Цианирование – диффузионное насыщение поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при 820...950 °С в расплаве, содержащем цианистые соли. Используют для повышения твердости, износостойкости, предела выносливости при изгибе, контактной выносливости. С повышением температуры содержание азота в слое понижается, а содержание углерода возрастает, и по своим свойствам слой приближается к цементированному. Различают среднетемпературное и высокотемпературное цианирование. Подвергают детали после окончательной механической обработки или небольшими припусками на шлифование. Твердость после термической обработки – 58...62 HRC. Цианированный слой по сравнению с цементированным обладает более высокой износостойкостью и эффективно повышает предел выносливости. Для получения слоя большей толщины (0,5...2,0 мм) применяют высокотемпературное или глубокое цианирование при 930...950 °С в ванне, содержащей 8 % NaCN, 82 % BaCl и 10 % NaCl (состав ванны до расплавления). Достоинство высокотемпературного цианирования – небольшая продолжительность процесса, малые деформации и коробления сложных деталей, высокое сопротивление износу и коррозии.

Сульфидирование – термохимический процесс обработки изделий, изготовляемых из сплавов на железной основе, для обогащения поверхностных слоев серой. Производят в жидкой, твердой или газовой серосодержащей среде; может быть низко-, средне-, высокотемпературным: 150...450; 540...580; 850...950 °С. в поверхностном слое образуются фазы FeS и FeS₂. Шероховатость повышается, размеры увеличиваются, деформация незначительна. Суль-

фидная пленка, имеющая меньшую плотность, чем основной металл, легко разрушается при трении и отделяется от основания без его пластического деформирования, предотвращая схватывание трущихся поверхностей. Продукты износа активизируют действие смазочного масла. Все это ускоряет приработку поверхностей и обеспечивает малую шероховатость после приработки. Применение: поршни и кольца двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и паровых машин, поршни и подшипники скольжения насосов, центрифуг, выпускные клапаны и т.д. Положительный эффект проявляется при сульфидировании даже одной детали пары трения, при циркуляционном смазывании эффект проявляется на всех узлах, так как сульфидная пленка разносится током масла.

Сульфоцианирование – метод одновременного диффузионного насыщения поверхностных слоев серой, азотом и углеродом с образованием самой верхней поверхностной прослойки сульфидов. Сульфоцианирование обычно ведут в ваннах в расплавах солей при температуре 560...580 °С в течение 1,5...2 ч. За это время в зависимости от марки стали и состава ванны получают обогащенный серой, азотом и углеродом слой глубиной от 0,05 до 0,10 мм. По окончании процесса детали охлаждают на воздухе, промывают в горячей воде, сушат и промасливают. Карбонитридная структура повышает контактную выносливость пар трения (например, зубчатых колес). Сульфидная прослойка интенсифицирует процесс приработки. Сульфоцианирование существенно повышает износостойкость пар трения при работе в различных условиях, в частности в чистой воде. При этом высокая износостойкость сохраняется даже после износа детали на глубину, превосходящую глубину сульфоцианированного слоя. Также увеличивается усталостная прочность чугунов и сталей за счет упрочнения поверхностного слоя и образования в нем напряжений сжатия.

Титановое антифрикционное оксидирование – насыщение кислородом поверхности титановых сплавов при повышенных температурах (термическое оксидирование), в результате чего на поверхности образуется окисная пленка и слой твердого раствора кислорода в титане (т. н. альфированный слой). Проводится для повышения антифрикционных свойств титановых сплавов. Перед оксидированием поверхность трения подвергается гидропескоструйной обработке с последующим обезжириванием. Детали нагревают в печи до 700...800 °С со свободным доступом воздуха в течение 1...12 час. Охлаждение вместе с печью до 300 °С, далее – на воздухе. После оксидирования детали обезжиривают, наносят на поверхность трения лак и нагревают при 140...160 °С для полимеризации лака (последняя операция не обязательна). Улучшение антифрикцион-

ных свойств титана и его сплавов после оксидирования обусловлено благоприятным сочетанием высокой твердости поверхностной окисной пленки (1200 HV), хорошим сцеплением ее с альфированным слоем, а также способностью обработанной поверхности удерживать смазку. Оксидированные детали хорошо работают на трение в паре с одноименным материалом, со сталью и цветными сплавами; допустимые нагрузки до 100 кгс/см²; скорости скольжения до 0,5 м/с с непрерывной подачей смазки; коэффициент трения при этих условиях составляет 0,06...0,07.

Борирование – химико-термическая обработка изделий, состоящая в насыщении поверхностного слоя бором. Проводят в порошковых смесях, в расплавах солей и окислов, в газовых средах и из паст. Продолжительность 5...10 часов при температуре $\approx 950...1100$ °С, толщина слоя 0,15...0,25 мм. Борирование повышает твердость (до 1400...1500 HV, $H_{\mu} = 1800...2000$), теплоустойчивость и износостойкость при высоких температурах. Борированные стали обладают высокой коррозионной стойкостью в водных растворах соляной, серной и фосфорной кислот. Борированные слои на углеродистых сталях устойчивы к воздействию кипящих водных растворов NaOH и KOH, а также расплавов цинка, свинца, олова, кадмия. Наличие хрупкой составляющей (борид железа) ограничивает применение борирования. Применяют при изготовлении втулок буровых насосов, штампов, матриц, пресс-форм, осей, пальцев, роликов и т. д. – преимущественно для деталей без острых углов, работающих в абразивной среде.

Силицирование – процесс химико-термической обработки, состоящий в высокотемпературном (950...1100 °С) насыщении поверхности стали кремнием. Силицирование придает стали высокую коррозионную стойкость в морской воде, в азотной, серной и соляной кислотах, увеличивает износостойкость. Силицирование может производиться в газообразных и жидких средах как электролизным, так и безэлектролизным методом. Силицированный слой отличается повышенной пористостью, толщина 300...1000 мкм. Несмотря на низкую твердость 200...300 HV, слой обладает высокой износостойкостью после пропитки маслом при температурах 170...200 °С. Применяют для обработки гнезд клапанов, вкладышей подшипников, роторов водяных насосов, рубашек цилиндров, трубопроводной арматуры, труб судовых механизмов и др.

3.3. Электрохимические и химические методы

Электроискровое упрочнение – процесс основан на преимущественном разрушении (эрозии) материала анода при искровом разряде и переносе его на поверхность катода (изделия). Механизм процесса представляет собой совокупность эрозионного, термического и термохимического явлений и контактного переноса материала. Упрочнение поверхностного слоя происходит не только за счет осаждения материала анода, но и в результате взаимодействия этого материала с основой и образования твердых растворов, химических соединений, оксидов, нитридов, а также импульсного воздействия температур и давлений, приводящих к измельчению структуры и образованию новых фаз. Для упрочняющих электродов (анода) применяют твердые сплавы, составляющими которых являются карбиды титана и вольфрама и кобальт, феррохром, хром-марганец, хром, алюминий, белый чугун, сталь и графит. Электроискровое упрочнение применяют для повышения износостойкости и твердости поверхности деталей машин, работающих при повышенных температурах, в абразивной среде: лопатки дробеструйных аппаратов, детали механизмов литейных цехов. Метод получил также применение для восстановления и упрочнения посадочных мест в неподвижных сопряжениях и скользящих посадках.

Электродуговое упрочнение – нанесенный электроискровым способом с помощью твердосплавного электрода слой подвергается кратковременному воздействию электрической дуги, получаемой на той же установке при отключенной электрической емкости. При второй операции под белым слоем образуется слой толщиной 1,5...2 мм с твердостью, снижающейся от 1000 HV до 500 HV. Применяют для упрочнения работающих в абразивной среде деталей прессов при изготовлении кирпича, деталей шнеков цементных заводов, машин керамического производства и т. д.

Электролитическое хромирование применяют для повышения износостойкости и восстановления деталей машин, контрольного, измерительного и режущего инструмента, а так же формообразующих элементов штампов и пресс-форм, дыропробивных пуансонов и матриц. Изменяя плотность тока и температуру раствора электролита, можно изменять твердость покрытия в пределах 450...1000 НВ. При этом износостойкость покрытия может изменяться почти в 10 раз. Так, регулируя технологические параметры температуру и плотность тока, получают различную поверхность – гладкую блестящую; глад-

кую, полублестящую; очень твердую; матовую и хрупкую. При химическом травлении получают пористое хромовое покрытие.

Электролитическое никелирование применяется для повышения износостойкости и для восстановления шпинделей металлорежущих станков, поршневых пальцев, гильз цилиндров, поршней гидравлических машин, направляющих, втулок и др. Толщина слоя может достигать 1,25 мм. Коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, что обеспечивает высокое значение адгезии никелевых покрытий и способность их работать в условиях больших нагрузок при переменных температурах. Для увеличения твердости и прочности сцепления покрытия с основным металлом деталь подвергают нагреву в течение 1 часа при температуре 300...400 °С. При трении без смазочного материала износостойкость никелевого покрытия в 2,5...3 раза выше, чем закаленной стали, и на 10...20 % ниже, чем электролитического хрома. Мощность источников постоянного тока при никелировании в 3...4 раза меньше, чем при хромировании, а расход электроэнергии меньше в 20 раз.

Электролитическое железнение – процесс электролитического осаждения железа из водных растворов его закисных солей. Железо осаждают на катоде; анодом служат прутки или полосы малоуглеродистой стали. Электролитически осажденное железо отличается высокой химической чистотой, благодаря чему его коррозионная стойкость выше, чем малоуглеродистой стали; по структуре состоит из вытянутых по направлению к покрываемой поверхности зерен. Применяется как средство наращивания металла на изношенную поверхность стальных и чугунных деталей при восстановлении их размеров, толщина слоя может достигать 8 мм. Для повышения твердости возможно дальнейшее хромирование или цементация покрытия. Для получения износостойких покрытий с повышенными механическими свойствами и улучшенной структурой железнение производят в электролитах, содержащих марганец или никель.

Фосфатирование – процесс образования на поверхности металла пленки нерастворимых фосфорнокислых солей. Применяется с целью защиты от коррозии и повышения износостойкости для режущего инструмента, работающего в условиях трения, при упрочнении поршневых колец ДВС, зубчатых колес и др.. Обладает электроизоляционными свойствами. Повышает хрупкость стали.

Никель-фосфатирование – процесс создания на поверхности изделия тонкой пленки за счет проведения вблизи поверхности химической реакции с

выделением одного или нескольких элементов и осаждением их на поверхность. Способ позволяет повысить стойкость пресс-форм для литья под давлением, штампов, лезвийных инструментов. Уменьшает силу трения при резании, резко снижает температуру в зоне резания, облегчает выход стружки, обеспечивает высокую износостойкость инструмента. Высокая твердость режущей кромки инструмента 65...68 HRC сохраняется при температуре выше 600 °С.

Оксидирование – процесс искусственного образования оксидной пленки на поверхности металла. Применяется в машиностроении, морском судостроении, оптико-механической промышленности и др. для получения защитно-декоративного покрытия изделий из черных металлов, алюминия, меди, магния, цинка и их сплавов, а также для получения тонких электроизоляционных слоев.

ГЛАВА 4. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Покрытие – слой материала, образованный естественным или искусственным путем на поверхности элемента, выполненного из другого материала. Покрытия чаще всего применяются для повышения износостойкости, поверхностной твердости изделий и с целью восстановления рабочих поверхностей, поврежденных вследствие изнашивания, коррозии, эрозии, кавитации. Покрытия формируются непосредственно на поверхности элемента или в приповерхностном слое. Могут быть одно- и многослойные, одно- и многокомпонентные (выполненные из нескольких материалов).

Толщина покрытия критическая – предельная толщина покрытия, при которой его фрикционные свойства начинают отличаться от свойств материала покрытия в «массивном» состоянии.

Металлизация – покрытие поверхности изделия металлами и сплавами для сообщения физико-химических и механических свойств, отличных от свойств исходного материала. Применяется для защиты изделий от коррозии, износа, эрозии, для повышения твердости, жаростойкости и в др. целях.

Виды металлизации разделяются по принципу взаимодействия подложки с наносимым металлом (табл. 3.7).

Таблица 3.7. Виды металлизации

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ		
ГРУППА 1	ГРУППА 2	
	подгруппа 2а	подгруппа 2б
Электролитические покрытия: Cr, Zn, Cd, Cu, Pb, Sn, Ag, Ni–Sn, Ni–Co, Cr–Ni, бронза и др.	Плакирование, в т.ч. металлизация взрывом: Cu, Al, Ni, Ag, W, Ta, латунь, бронза нержавеющей сталь	Диффузионная металлизация элементами: Sn, Al, Cr, Ag, Au, W, Mo, Nb, Zn, Ti, Zr, Ta, U и др.
	Плазменное напыление: W, Mo, Ni, Al, Cr; Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , HfO ₂ , MoSi ₂ , WC, NbC, ZrB ₂ , TiB ₂ , CrBe ₂	
Распыление (пудверизация) электродуговым или газопламенным способом: Al, Cu, Sn, Pb, Zn, Cr, Ag, Au; бронза, латунь, сталь	Погружение в расплав металлов: Zn, Sn, Pb, Al и др.	
	Электрофорез: W, Mo, Al, Cu, Cr и др.	

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ		
ГРУППА 1	ГРУППА 2	
	подгруппа 2а	подгруппа 2б
Химическая металлизация: Ag, Cu, Ni, Co, Hg, Sb, Au, Pt, Sn, Zn, PbS и др.	Вакуумная металлизация на нагретой подложке: Cr, Ti, Al, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ и др	Диффузионная металлизация сплавами: Cr–Al, Al–Cr–Si, Ti–Cr–Si, Ta–Al и др.
	Электролитические покрытия с последующим отжигом: Cr, Zn, Cd, Al, Ni, Ag.	
Вакуумная металлизация на холодной подложке: Zn, Cd, Al, Ti, Cr, Au, Ag, Pt, Cu, Sn, W, Mo, Ta; Zn–Al, Pb–Zn, Pb–Cd и др.	Осаждение чистых металлов из карбонильных соединений в газовой фазе: <i>Cr, Co, W, Ni, Mo, Ta</i> и др.	
	Осаждение карбидов, нитридов, боридов, силицидов из газовой фазы: TiC, NbC, W ₂ C, HfC, Cr ₃ C ₂ , VC, ZrC, MoS ₂ и др.	
Катодное распыление: Au, Ag, Pt, Ta.		

Группа 1 – сцепление покрытия осуществляется механически – силами адгезии.

Группа 2 – сцепление обеспечивается силами металлической связи; 2а – с образованием диффузионной зоны на границе сопряжения поверхностей, за пределами которой покрытие состоит из наложенного слоя металла; 2б – с образованием диффузионной зоны в пределах всего слоя покрытия.

Группы 1 и 2а – наложение слоя на поверхность холодного или слегка нагретого изделия; 2б – изделие нагревается до высоких температур; образуется сплав.

4.1. Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – диффузионное насыщение различными металлами поверхностных слоев металлических изделий с целью придания поверхности изделия комплекса необходимых физико-механических и специальных свойств, в том числе износостойкость. Виды диффузионной металлизации: алитирование, диффузионное хромирование, молибденирование, марганценирование, хромоалитирование, хромотитанирование и др. Обработка возможна из различных фаз: твердой, паровой, газовой, жидкой [46].

Хромирование – насыщение поверхности изделий хромом. Диффузионному хромированию подвергают чугуны, стали различных классов, сплавы на основе никеля, молибдена, вольфрама, ниобия, кобальта и металлокерамические материалы. Проводят в порошкообразных смесях феррохрома (или хро-

ма), хлористого аммония и окиси алюминия при 1000...1050 °С с выдержкой 6...12 ч. Хромирование также производят в вакуумных камерах при 1420 °С (18...24 ч, слой толщиной 2,0...2,5 мм). Хромирование обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окалиностойкость) до 800 °С, повышает твердость (1200...1300 HV) и износостойкость. Используют для упрочнения деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, различных деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

Алитирование – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий алюминием с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости. Наибольшее распространение получило алитирование стальных изделий в порошках с насыщением из газовой фазы. Порошкообразная смесь состоит из ферроалюминия, хлористого аммония и окиси алюминия. Алитирование проводят при 950...1050 °С в течение 3...12 ч. В зависимости от метода и режима насыщения концентрация алюминия может достигать до 58 % (по массе) на поверхности и соответствовать образованию фазового слоя FeAl_3 . В результате обработки сталь приобретает высокую окалиностойкость (до 850...900 °С), слой обладает также хорошим сопротивлением коррозии в атмосфере и морской воде. Толщина алитированного слоя достигает 0,2...1,0 мм, твердость (на поверхности) – до 500 HV, износостойкость низкая. Алитированию подвергают различные изделия, работающие при высоких температурах (в том числе литые лопатки газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов).

Цинкование – диффузионное насыщение поверхности изделий цинком. Стальные изделия, предварительно очищенные на пескоструйном аппарате, загружают во вращающийся барабан с цинковой пылью (5...10 % от массы деталей) и нагревают до 350...400 °С в течение 1 часа. Процесс можно вести и с помощью паров цинка – в печь при 870 °С вводится цинковая пыль в смеси с 20...40 % глинозема и через нее пропускается водород. Полученное покрытие состоит из поверхностного цинкового слоя и промежуточных интерметаллических соединений и твердых растворов, образованных цинком и железом. Цинкование обеспечивает высокую износостойкость, эффективно защищает от атмосферной и морской коррозии (стойкость в соляном тумане более 2000 часов).

4.2. Наплавляемые покрытия

Наплавка – нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность детали путем плавления присадочного материала теплотой кислородно-ацетиленового пламени, электрической или плазменной дуги и др. Применяется для упрочнения деталей в основном производстве при вновь изготавливаемых технических системах (машины, аппараты, механизмы) и для восстановления изношенных поверхностей деталей трибосистем узлов трения механизмов и машин, а также для повышения тепло- и триботехнических характеристик различного инструмента. Наплавка позволяет заменять высоколегированные стали углеродистыми или низколегированными сталями, уменьшать расход цветных металлов и сплавов.

При наплавке используются различные виды стали (углеродистые, низколегированные, сложные высоколегированные, высокомарганцевые, хромистые, хромоникелевые, хромовольфрамовые, быстрорежущие), стеллиты, карбиды металлов, сплавы металлов (W, Mo, Cr, Ni, Co). Наплавленные слои могут иметь значительную толщину.

Газовая наплавка – один из способов сварки плавлением, протекающей в условиях частичного оплавления основного металла при использовании высокотемпературного пламени, получаемого при сжигании смеси горючего газа с кислородом. В настоящее время применяют только в специальных областях (при изготовлении клапанов высокотемпературных систем высокого давления, двигателей внутреннего сгорания и т. д.). Этим способом упрочняют детали, изготавливаемые из среднеуглеродистых сталей 35, 40, 45, низко- и среднелегированных сталей 20X, 20X3, 18ХГТ, 30X, 35X, 40X (хромистых), 20ХН, 40ХН, 12ХНАЗ (хромоникелевых). Для наплавки используют проволоку или ленту из различных видов стали, из порошковых шлакообразующих материалов, сплавы на медной основе. Детали с наплавленным слоем подвергают термической и механической обработке. Детали с медным наплавленным слоем дают возможность реализации избирательного переноса.

Дуговая наплавка под флюсом – дуга при наплавке электродными материалами (проволокой, лентой и др.) скрыта под слоем гранулированного флюса, предварительно наносимого на поверхность основного металла.

Наплавка электродной лентой под флюсом – наплавка с помощью электрода в виде широкой стальной ленты, располагаемой в процессе наплавки практически под прямым углом к основному металлу. Применяется для на-

плавки коррозионно-стойких сталей, никель-хромовых жаропрочных сплавов и других коррозионно-стойких наплавочных материалов.

Электродуговая наплавка – процесс нанесения металла, выполняющего роль плавящегося электрода, на упрочняемую поверхность, при котором нагрев осуществляется электрической дугой. В зависимости от способа возбуждения дуги, подачи и перемещения электрода, а также вида защитной (наплавочной) среды различают наплавки: ручную, механизированную, электрошлаковую, дуговые сварки в защитном газе и под слоем флюса. Применяют для восстановления изношенных деталей (восстановительная наплавка) и для повышения триботехнических характеристик деталей (износостойкие и антикоррозийные наплавки, повышающие сопротивление поверхностных слоев металла абразивному и коррозионно-механическому изнашиванию).

Наплавка в среде защитного (инертного) газа – состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или иным инертным газом. Осуществляют в двух вариантах: плавящимся и вольфрамовым электродами. В первом случае дуга возникает между основным металлом и электродным наплавочным материалом. Во втором дуга возникает между основным металлом и вольфрамовым электродом. Процесс аргоно-дуговой наплавки, сходный с газовой наплавкой, протекает в условиях подачи наплавочного прутка и его плавления дугой. Данный способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию.

Электрошлаковая наплавка протекает в условиях непрерывной подачи электродной проволоки (или ленты) внутри слоя расплавленного шлака, а плавление их происходит за счет теплоты электросопротивления при пропускании тока между основным металлом и электродом.

Плазменная наплавка включает возникновение между основным металлом и электродом горелки (катодом) электрической дуги, обеспечивающей переход в плазменное состояние рабочего газа, подаваемого в зону дуги. При этом из сопла горелки истекает высокотемпературная плазменная струя, обеспечивающая плавление наплавочного материала.

Лазерная наплавка – метод восстановления старых или повышения прочности новых деталей машин и механизмов при помощи создания на поверхности изделия плакирующего слоя из порошкового материала с проплавлением его посредством лазерного луча. Осуществляют с помощью светового лазерного луча, излучаемого оптическим квантовым генератором. Локальная фокуси-

ровка излучения позволяет проводить наплавку труднодоступных мест. При этом исходная структура почти не изменяется, и таким образом удается достичь высокой износостойкости и предела усталости.

4.3. Напыляемые покрытия

Напыление – образование покрытия путем динамического осаждения на основном материале расплавленных или оплавленных капель или частиц напыляемого материала, образующегося при нагреве порошка, расплавленной проволоки или прутка различными источниками нагрева. В зависимости от источника тепловой энергии, используемой для нанесения покрытия, различают две технологические разновидности напыления: а) источником тепловой энергии служит смесь горючего газа и кислорода (газопламенное и детонационное напыление); б) – источником тепловой энергии служит электрический ток (электродуговое, высокочастотное и плазменное напыления).

Газопламенное (газотермическое) напыление применяют для повышения износостойкости деталей металлорежущих станков (направляющих станин, валов), деталей автомобильных двигателей, например, чугунных коленчатых валов. Толщина покрытия до 3 мкм, твердость поверхности выше твердости исходного материала, пористость около 15 %.

Детонационное напыление нанесение покрытия (металла, керамики и др.) за счет выбрасывания его из открытого сопла специальной установки. Разогрев и подача напыляемого материала происходит во время взрыва рабочей смеси (кислород и ацетилен). Процесс взрыва и наполнения камеры повторяется с частотой 3-4 цикла в секунду. За один цикл напыления получают покрытие толщиной ~ 6 мкм.

Плазменное напыление применяют в химическом и нефтяном машиностроении для защиты поверхностей трения (узлы специальной арматуры, гильзы, плунжеры насосов и др.) от гидроабразивного, эрозионного, эрозионно-абразивного и коррозионного изнашивания. Покрытия из тугоплавких порошковых материалов осуществляется с помощью специальной горелки – плазмотрона. Прочность сцепления покрытия 40...50 МПа, твердость 34...67 HRC, износостойкость при работе со смазочным материалом в 1,5...2 раза выше исходного материала.

Термическое вакуумное напыление – заключается в нагреве вещества в вакууме до температуры испарения с последующей конденсацией на подложке и

формировании пленки. Процесс испарения осуществляется по обычной схеме: твердая фаза – жидкая фаза – газообразное состояние. Некоторые вещества (магний, кадмий, цинк и др.) переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу (сублимация). Способы нагрева классифицируются следующим образом: резистивный, индукционный, электронно-лучевой, лазерный и электродуговой.

В *резистивных испарителях* тепловая энергия для нагрева испаряемого вещества образуется за счет выделения джоулева тепла при прохождении электрического тока через нагреватель.

При *индукционном напылении* масса расплавленного металла под действием сил электромагнитного поля, создаваемого катушкой, поднимается таким образом, что поверхность соприкосновения металла с тиглем оказывается минимальной. В результате происходит ослабление химических реакций между испаряемым металлом и тиглем, что значительно повышает чистоту наплавленного слоя.

Электронно-лучевое напыление осуществляется с помощью электронно-лучевых испарителей, которые позволяют получать тонкие пленки металлов, сплавов и диэлектриков. Хорошая фокусировка электронного пучка обеспечивает большую концентрацию мощности (до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²) и высокую температуру, что обеспечивает возможность испарения с высокой скоростью даже самых тугоплавких материалов. Метод позволяет получить высокую чистоту и однородность осаждаемой пленки, поскольку реализуется автотигельное испарение материала.

В *лазерных испарителях* нагрев испаряемого вещества, помещенного в вакуум, осуществляется при помощи фокусированного излучения оптического квантового генератора (ОКГ), находящегося вне вакуумной камеры. Нанесение пленок с помощью лазера возможно благодаря точной фокусировке излучения и дозировке его энергии, высокой плотности потока энергии ($10^8 \dots 10^{10}$ Дж/см²).

При *вакуумном дуговом* способе нанесения тонких пленок металлов и их соединений генерация потока вещества, составляющего основу покрытия, осуществляется за счет эрозии электродов электрической дугой. Принципиально возможно использование различных форм стационарной вакуумной дуги (дуга с холодным расходуемым катодом; дуга с распределенным разрядом на горячем расходуемом катоде; дуга с нерасходуемым полым катодом, горящая в парах материала анода).

4.4. Плакирование

Плакирование – метод нанесения покрытий за счет механических и термомеханического воздействия на два или более соединяемых материалов. Чаще всего плакирование распространяется на металлы и их сплавы. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии, стимулируемой высокой температурой. Применяется также диффузионная и контактная сварка, наплавка, припайвание и другие способы. Часто наносятся слои из порошковых металлов и керамики. Слои спекаются в конвейерных печах и прокатываются вместе с основным металлом в горячем состоянии. Так получают би- и триметаллы в виде ленты, листа, полос, проволоки, труб и других изделий простой геометрической формы и таким же образом наносят различные защитные, антифрикционные покрытия.

4.5. Методы ФАБО

Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) – окончательная обработка поверхностей деталей, сущность которого состоит в том, что поверхность трения детали покрывается тонким слоем латуни, бронзы или меди путем использования явления переноса металла при трении. Процесс ФАБО заключается в следующем (рис. 3.12): раствор глицерина с поверхностно-активными веществами (ПАВ) под давлением из трубопровода через канал корпуса 7, распылителя 5 и каналы 4 последнего поступает в кольцевую канавку 6, на концах которой установлены бронзовые наконечники 2, далее

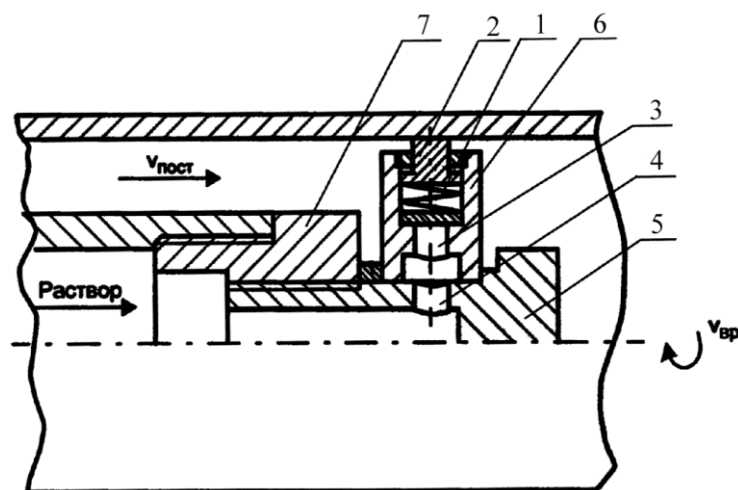


Рис. 3.12. Схема финишной антифрикционной безабразивной обработки цилиндрических поверхностей деталей

через радиальные каналы 3 в выходные каналы. В результате смещения относительно друг друга противоположно расположенных каналов 3 создается крутящий момент, обеспечивая тем самым вращение втулки. При взаимодействии струй раствора, выходящих из выходных каналов втулки, происходит дробление последних на мелкие частицы. Бронзовые наконечники прижимаются к обрабатываемой

поверхности отверстия при помощи пружин 1 и за счет центробежных сил, возникающих при вращении втулки, нанося тем самым тонкий слой бронзы или меди. В процессе трения окисная пленка на поверхности стали разрыхляется, поверхность контртела из медного сплава пластифицируется, и создаются условия для его схватывания со сталью. ФАБО обеспечивает высокую точность размеров с наличием слоя наносимого материала на обработанных поверхностях (толщина слоя 1...3 мкм) и малую шероховатость ($Ra = 1,25...0,08$ мкм), повышая износостойкость и исключая схватывание и задиры сопрягаемых пар изделий.

4.6. Поверхностное легирование

Поверхностное легирование – на поверхность литейной формы наносится паста, в состав которой входят легирующие элементы, которые положительно влияют на физико-механические свойства металла поверхностного слоя детали при ее отливке. Метод используется для отливок из стали и чугуна.

Электроискровое легирование – метод образования износостойкого слоя, при котором направленный выброс материала анода происходит вследствие взаимодействия электрического импульсного разряда между электродами.

Электроннолучевое легирование (термоэлектронная эмиссия, ионизация газов и др.) – насыщение поверхностных слоев легирующими элементами путем расплавления предварительно сформированного покрытия или нанесенной пасты. Поверхностный слой металла изделия расплавляется на определенную глубину, что приводит к перемешиванию обоих материалов и образованию их сплава. Повышение износостойкости поверхностных слоев наблюдается в случае их легирования (насыщения) никелем, хромом, карбидами бора и кремния с гальванических либо напыляемых (металлизационных) покрытий.

Вплавление – способ поверхностного легирования, при котором в расплавленный металл поверхностного слоя вводится измельченный легирующий материал (карбиды, бориды, нитриды и т.п.) или подается под повышенным давлением струя газа (азота, двуокиси углерода, ацетилена).

Лазерное поверхностное легирование – насыщение материала легирующими элементами посредством диффузии предварительно нанесенного слоя под воздействием лазерного пучка. При этом достигается высокая концентрация легирующих компонентов в поверхностных слоях материалов. Обработка может производиться нанесением обмазки (легирующий элемент + связка) либо непосредственно из жидкой фазы (например, суспензии). Для данного метода харак-

терны: хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя; высокая скорость процесса; возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом; экономия дорогостоящего легирующего материала; отсутствие необходимости в последующей термообработке.

Ионное легирование – внедрение, введение посторонних атомов внутрь твердого тела (мишени) путем бомбардировки его поверхности ионами.

Эвтектические покрытия – поверхностное упрочнение металлов и сплавов с образованием эвтектического слоя нанесением специальной пасты с последующим краткосрочным (2...30 с) нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Покрытия также формируются путем наплавки порошков в защитной атмосфере, газопламенным напылением, электроискровым поверхностным легированием и другими методами.

Химические газоконденсационные методы – конденсация (осаждение) покрытия из газовой фазы вследствие химической реакции при активации среды электрическим тлеющим разрядом.

Физические газоконденсационно-вакуумные методы – группа методов поверхностной обработки, использующих физические явления и процессы, протекающие при пониженных давлениях: получение паров металлов или сплавов; электрическая ионизация паров и реактивных газов с целью получения плазмы; кристаллизация из плазмы металла или соединения в газовом состоянии либо на относительно охлажденное основание; конденсация составляющих плазмы (молекул, атомов, ионов) на относительно охлажденное основание. Практически во всех методах этого типа покрытия формируются из потока ионизированной плазмы, направленной электрически на достаточно охлажденное основание.

4.7. Фрикционно-упрочняющая обработка

Фрикционно-упрочняющая обработка – метод фрикционно-термомеханического упрочнения поверхностей трения стальных и чугунных элементов узлов трения, при котором в результате интенсивного нагрева поверхностного слоя упрочненной детали с одновременной пластической деформацией под влиянием высоких контактных давлений и быстрого охлаждения за счет отвода тепла вглубь металла образуется т. н. «белый слой». В зависимости от условий их формирования свойства этих структур могут резко отличаться от свойств исходного металла и между собой. «Белые слои» принято разделять на аустенитно-мартенситные и карбидные.

ЧАСТЬ 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА

ГЛАВА 1. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Основные этапы восстановления

1.1.1. Подготовка деталей. Очистка

В подготовку деталей к процессу восстановления входят разборочные и очистные работы.

Эксплуатационные загрязнения образуются как на наружных, так и на внутренних поверхностях.

На наружных поверхностях – это остатки материалов, с которыми взаимодействовала машина: масла и смазки, маслогрязевые отложения, герметизирующие мастики, лакокрасочные покрытия, продукты коррозии и др.

На внутренних поверхностях в результате старения и химико-термических превращений смазочных материалов образуются углеводородные отложения, продукты механического изнашивания, остатки от герметизирующих паст и прокладок, а также накипь, образующаяся от взаимодействия охлаждающих жидкостей с металлическими стенками.

В процессе восстановления детали машин покрываются *технологическими загрязнениями* (окалиной, стружкой, притирочными пастами, смазочными маслами, очистными материалами, продуктами приработочного износа и др.). Та-

кие загрязнения обязательно должны быть удалены с деталей перед сборочными операциями.

Виды загрязнений. По химическому составу загрязнения можно разделить на минеральные и органические (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Способы очистки и очистные среды

Виды загрязнений	Способ очистки	Очистная среда	Препараты
Грязь, растительные остатки, пыль, маслянисто-грязевые отложения	В растворах моющих средств	Щелочи, щелочные соли	Каустическая сода, силикаты, едкий натр, силикат натрия (жидкое стекло)
Масляные: остатки топлива, масел и смазок	В растворах синтетических моющих средств	Натриевые соли неорганических кислот с синтетическими ПАВ	Кальцинированная сода, жидкое стекло, двойная соль метасиликата натрия, органические электролиты с добавками ПАВ
Лаковые пленки, нагар	В растворяюще-эмульгирующих средствах	Углеводороды, ПАВ, стабилизаторы	Ксилол, уайт-спирит, ализариновое масло, едкий натр, трихлорэтилен
Накипь, продукты коррозии и механического изнашивания деталей	Обработка растворами кислот (химическое травление), ручным инструментом	Кислотные и щелочные растворы	Серная кислота, азотная кислота, хромовый ангидрид
Старые лакокрасочные покрытия	В растворах щелочных средств с помощью смывок	Щелочные растворы	Смывки: ацетон, бензол, этиловый спирт, скипидар, толуол

Минеральные загрязнения появляются от взаимодействия деталей с почвой, пылью, растительными остатками и маслянисто-грязевыми отложениями.

Органические загрязнения образуются в результате взаимодействия топлив и масел с газами и влагой, продуктами изнашивания и поверхностями деталей при повышенной температуре.

В зависимости от соотношения составляющих веществ загрязнения подразделяются на масляные (остатки смазочных материалов), лаковые, абразивные, осадки, накипь и нагар.

Кроме загрязнений на поверхностях деталей могут присутствовать продукты коррозии, которые образуются в результате химического и электрохимического разрушений металла.

Очистные среды. По виду основного технологического эффекта очистные среды подразделяются на растворяющие, эмульгирующие и диспергирующие.

Основные явления, обуславливающие очистное действие среды, включают: растворение, смачивание, физико-химическую адсорбцию, эмульгирование, диспергирование и стабилизацию загрязнений.

Технические моющие средства (ТМС) – многокомпонентные смеси, состав которых подбирают для применения в конкретном технологическом процессе очистки деталей из определенного материала от заданных загрязнений. Большинство ТМС состоят из смесей щелочных неорганических веществ: кальцинированной соды, силиката натрия, простых и полимерных солей фосфорной кислоты с небольшими добавками ПАВ.

Неомыляемые загрязнения удаляются с поверхности детали путем их механического дробления потоком твердых частиц (косточковой крошкой фруктовых растений, стеклянными шариками диаметром 0,3...0,8 мм, частицами полиэтилена или полиамида, корундом, чугуновой и стальной дробью, кварцевым песком). Среда переноса этих частиц – сжатый воздух, вода, растворы ТМС.

Расплав щелочей и солей, который состоит из едкого натра, азотнокислого натрия и хлористого натрия, очищает поверхности деталей практически от всех видов загрязнений.

Серную и соляную кислоты используют для травления, очистки от продуктов коррозии, накипи, лакокрасочных покрытий и асфальтосмолистых отложений. Применяют также уксусную, щавелевую, олеиновую, лимонную и нефтяную кислоты.

Растворы *каустической соды* применяют в выварочных ваннах для снятия старой краски.

Перспективно применение *гранулированного сухого льда*, который полностью испаряется после очистки поверхностей.

Схема процесса очистки. Качественную очистку машин обеспечивает процесс, состоящий из 5 основных операций: наружную очистку агрегатов с выпариванием внутренних полостей (удаляют до 80 % загрязнений), очистку подработорованных агрегатов, очистку сборочных единиц, общую очистку деталей и очистку деталей от прочных загрязнений в специальных технологических машинах.

Очистное оборудование. Основной объем очистки выполняют в жидких технологических средах в струйных или погружных машинах проходного или тупикового типа. Кроме этих машин применяются машины, специализированные на очистке от прочных загрязнений различных видов.

Контроль качества очистки деталей. Применяют следующие способы контроля остаточной загрязненности поверхностей: смачиванием водой, весовой, протиранием и люминесцентный.

Способ смачивания водой основан на способности металлической поверхности удерживать непрерывную пленку воды, если эта поверхность свободна от гидрофобных загрязнений. При наличии на поверхности минеральных масел в количестве $>0,01$ мг/см² водяная пленка разрывается мгновенно, при $0,005$ мг/см² разрыв наступает через 4...7 с. Для смачивания применяют холодную дистиллированную воду, которую наносят на поверхность детали ее погружением. Способ применяют для деталей с шероховатостью поверхностей $Ra < 3,2$ мкм.

При использовании *весового способа* загрязнения снимают путем растворения (с последующей экстракцией) или соскабливания, взвешивают их и относят к площади поверхности. Протирание ведут фильтровальной бумагой, бумажной салфеткой или ватным тампоном, а количество загрязнений определяют взвешиванием. Способ является основным при контроле качества очистки каналов и внутренних полостей и дополнительным к способу смачивания.

Люминесцентный способ основан на свойстве масел светиться под влиянием ультрафиолетового света. Степень очистки оценивают по отсутствию или наличию свечения и его интенсивности.

1.1.2. Определение технического состояния

После очистки детали ремонтного фонда сортируются на три группы: годные для дальнейшего применения, подлежащие восстановлению и не подлежащие восстановлению (утиль). Детали поступают на сортировочный участок, где производится измерение значений установленных параметров исходных деталей и выделение их в одну из трех названных групп. На деталях, относящихся ко второй группе, находят сочетания повреждений и устанавливают маршруты восстановления [21].

Виды и классификация повреждений. Повреждения деталей – это недопустимые, приобретенные в эксплуатации отклонения значений свойств материала деталей и геометрических параметров от номинальных, положенных при изготовлении или ремонте.

Повреждения деталей бывают в виде: *износов, усталостных изменений, деформаций, трещин, пробоин, коррозии и старения материала*. Повреждения по месту возникновения подразделяются на *наружные и внутренние*. Наруж-

ные повреждения определяют органолептическим методом или измерениями, а внутренние – средствами структуроскопии (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Показатели повреждений и средства их определения

Контролируемые показатели	Средства измерения	Метод контроля
Линейные размеры (диаметр, длина, глубина, расстояние между осями отверстий и т. д.)	Штангенинструменты, микрометрические инструменты, рычажно-зубчатые приборы, калибры	Проверка размеров наружных и внутренних поверхностей; определение предельных отклонений от номинальных размеров
Угловые размеры	Угломеры, шаблоны, угловые меры	Проверка углов между плоскостями, осями, образующими
Элементы резьбы	Резьбомеры, резьбовые калибры	Проверка годности резьбовых изделий
Отклонения: - от круглости - от цилиндричности - от прямолинейности - от плоскостности - от формы заданного профиля - от соосности относительно общей оси	Индикаторные приспособления, призмы, поверочные линейки и плиты, шаблоны, калибры	Измерения в нескольких направлениях и сечениях; измерение биения поверхности детали, установленной в призму; проверка «на просвет» и измерение зазора щупом; проверка на краску; проверка калибром
Радиальное и торцевое биение	Приборы проверки биения, струбцина с индикатором,	Проверка при вращении в центрах; проверка при вращении на призмах
Расположение осей и поверхностей	Угломеры, специальные индикаторные приспособления	Проверка взаимного расположения поверхностей
Параметры шероховатости	Профилометры	Снятие профилограмм с последующей их обработкой
Твердость поверхности	Твердомеры	Определение твердости путем вдавливания стального шарика или алмазной пирамиды
Целостность детали (трещины, пробоины и т.д.)	Магнитные, люминисцентные, ультразвуковые дефектоскопы	Магнитные, капиллярные и звуковые способы контроля; рентгено- и гаммадефектоскопия

Основные характеристики повреждений:

- отклонения размеров, формы и взаимного расположения элементов от нормативных значений;
- размеры трещин и пробоин;
- расход среды из-за течей;
- механические.

Процессы и средства для определения повреждений. Операции по определению повреждений следующие: простукивание и наружный осмотр; измерения линейных и угловых размеров; измерение параметров формы и располо-

жения поверхностей; обнаружение поверхностных трещин; определение течей; измерение специальных характеристик.

Организация работ. При отсортировке деталей по годности назначают *качественный контроль*, так как детали могут иметь критические повреждения.

При ремонте обычно устанавливают факт наличия повреждений без определения количественных характеристик. Исключение составляют повреждения, способ устранения которых назначается в зависимости от величины повреждений (значений износов, длин трещин, площади пробоин и др.). В первую очередь находят повреждения, при наличии которых деталь отбраковывают. Повреждение помечают на детали и в соответствующем поле ведомости. Отсутствие пометки означает годность элемента детали.

Определение остаточного ресурса деталей. Остаточный ресурс деталей прогнозируют с применением различных способов и средств диагностирования. При этом учитывают значения диагностических параметров, предыдущую наработку и условия работы. В этом случае полагают, что скорость изнашивания или закономерность изменения диагностических параметров остаются постоянными. В связи с тем, что около 85 % деталей машин теряют работоспособность в результате изнашивания, то наибольший интерес на практике представляет параметр износа. Чаще всего при прогнозировании остаточного ресурса деталей используется функционально-статистический способ, основанный на среднестатистических закономерностях изменения диагностируемых параметров во времени.

Формирование маршрутов восстановления деталей. В зависимости от вида производства для восстановления деталей применяют следующие технологии: подефектную, групповую, маршрутно-групповую, и маршрутную.

Подефектная технология состоит в устранении каждого дефекта в отдельности. Комплектование деталей в партии осуществляют только по наименованиям.

При *групповой технологии* детали классифицируют по конструктивным и технологическим особенностям с последующим объединением их в технологические группы. Классификация основана на следующих принципах: общность геометрических форм изношенных деталей; общность деталей по материалу, точности обработки и термической обработке; наличие однотипных дефектов; возможность применения однотипных способов устранения дефектов; возможность осуществления технологического процесса восстановления деталей группы на однотипном оборудовании.

Маршрутная технология основана на взаимосвязи дефектов, минимальном перемещении деталей, наименьшей разнице в трудоемкости устранения дефектов, объединении различных дефектов, которые могут быть устранены на общих рабочих местах одинаковыми технологическими способами. Эту технологию целесообразно применять на крупных предприятиях по восстановлению деталей узкой номенклатуры с большими программами.

Маршрутно-групповую технологию применяют при восстановлении деталей широкой номенклатуры с использованием преимуществ маршрутной технологии. В этом случае детали комплектуют на участке дефектации в технологические маршруты по сочетанию дефектов и конструктивно-технологическим признакам. В соответствии с маршрутом детали запускают в производство партиями.

1.2. Восстановление износостойкости, усталостной выносливости и жесткости

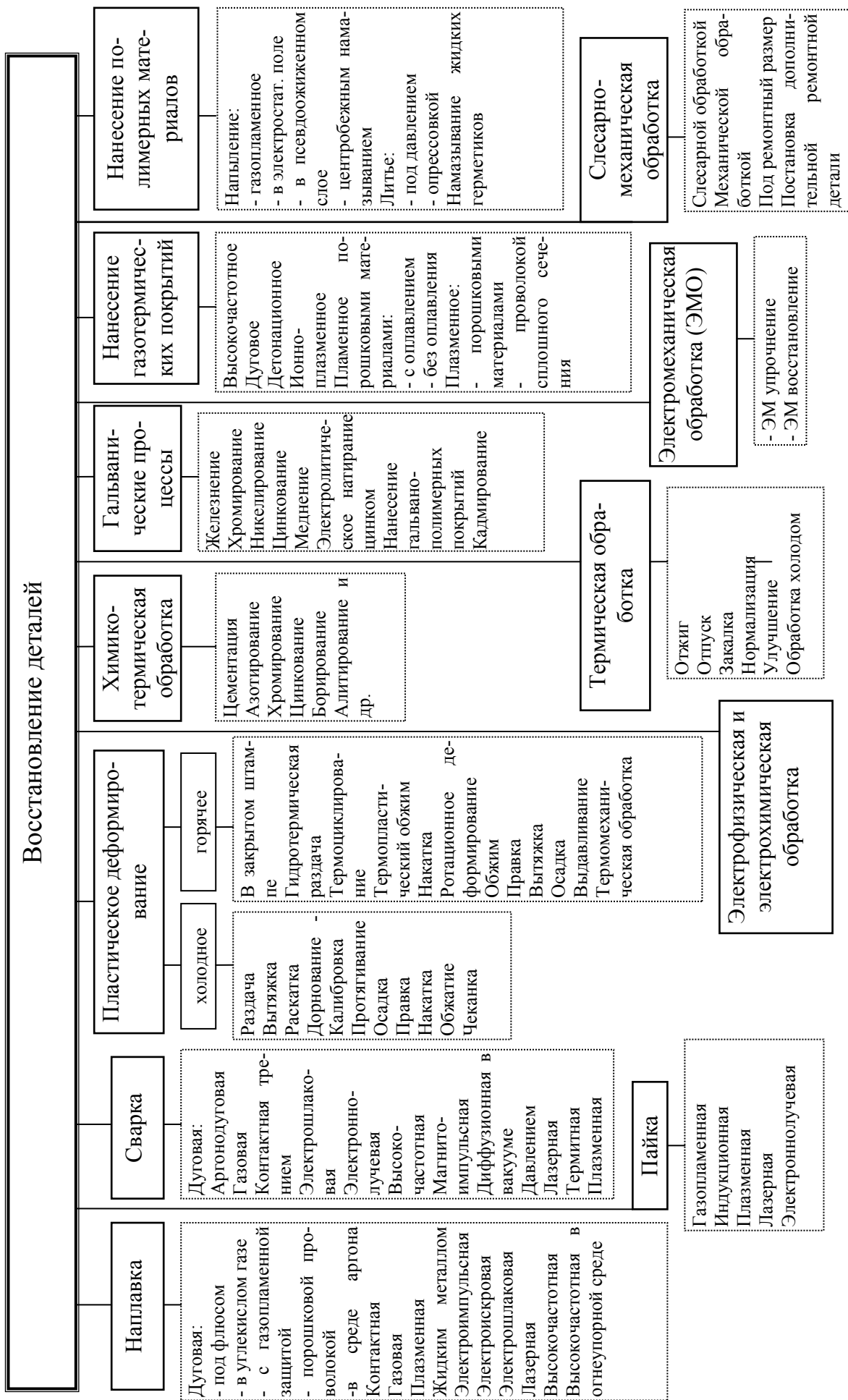
Детали, подвергающиеся износу, подразделяются на две группы: детали, образующие пары трения, и детали, изнашивание которых вызывает внешняя рабочая среда (жидкость, абразивные частицы, газ и др.). Требуемый уровень восстановления износостойкости деталей зависит от того, к какой группе принадлежит деталь.

К деталям первой группы относятся подшипники скольжения, детали цилиндропоршневой группы гидравлических, пневматических механизмов и двигателей внутреннего сгорания, зубчатые передачи и др. Виды изнашивания деталей первой группы – абразивное (твердыми частицами, попадающими в зону контакта), адгезионное, окислительное, усталостное, фреттинг. Поскольку эти детали работают в паре трения, их износостойкость и ресурс должны быть согласованы с ресурсом всего механизма. Оптимальной задачей при восстановлении этих деталей является обеспечение износостойкости и ресурса, близких к новой детали.

Детали второй группы подвержены только разрушающему воздействию внешней среды. Интенсивность изнашивания этих деталей велика, поэтому ресурс всего механизма ограничивается именно работоспособностью этой детали.

Потеря износостойкости носит локальный характер. Ремонту подлежат лишь рабочие поверхности. Поэтому применяются технологии, способные восстановить работоспособность отдельных участков детали. К ним относятся: методы поверхностной закалки, напыления и наплавки износостойких покрытий, лазерное упрочнение, микропрофилирование и др., см. табл. 4.3.

Таблица 4.3. Основные технологии восстановления работоспособности детали



Следует иметь в виду, что при восстановлении износостойкости трибоповерхности детали необходимо согласование с сопрягаемой поверхностью. То есть восстановлению подлежит контакт пары трения. При этом контролируются такие параметры: размеры с допусками, зазоры, форма поверхностей, шероховатость, элементы системы смазки, физико-механические свойства поверхностного слоя, адаптационные способности и т. п.

Знакопеременную нагрузку воспринимают валы, зубчатые колеса, зубчатые муфты. Среди вращающихся деталей наиболее подвержены усталостному разрушению коленчатые валы. Усталостные повреждения в них накапливаются при кратковременных перегрузках двигателя из-за неравномерного износа шеек, неравномерной подачи топлива в цилиндры и несоосности коренных опор блока цилиндров.

Усталостную выносливость, как и *жесткость*, восстанавливают методами, повышающими твердость и модуль Юнга. Часто при этом предварительно восстанавливают форму рабочих поверхностей наплавкой, напылением и т. п.

1.3. Технология восстановления изношенных деталей без разборки узлов

Безразборное восстановление – это комплекс технологических операций восстановления износостойкости без проведения разборочно-сборочных операций.

Ремонтно-восстановительные составы – композиции, способные создавать на сопрягающихся поверхностях деталей различные покрытия (керамические, металлокерамические, органометаллокерамические, алмазноорганические и другие), восстанавливающие форму изношенных деталей и защищающие их от дальнейшего износа. По составу, физико-химическим процессам их взаимодействия с трущимися поверхностями, свойствам защитных пленок, механизму функционирования восстановители делятся на три основные группы:

- металлокерамические материалы (геомодификаторы);
- металлоплакирующие композиции (реметаллизанты);
- полимерсодержащие препараты.

Условно к восстановителям относятся продукты, которые можно разделить на дополнительные группы:

- кондиционеры металла;
- слоистые добавки – модификаторы трения;
- добавки на основе алмазов.

Геотрибология – направление трибологии, изучающее процессы трения, износа и смазывания в условиях применения различного рода минералов и других соединений геологического происхождения. Целью является создание специальных добавок в топливно-смазочные материалы на базе металлокерамических соединений, обладающих высокими антифрикционными и противозносными свойствами, а также способными частично восстанавливать (компенсировать) дефекты поверхностей трения. Такие материалы получили наименование *геомодификаторов*, или геоактиваторов.

Геомодификаторы – добавки (в основном на основе измельченного и модифицированного серпентинита, а также других минералов естественного и искусственного происхождения), которые обладают высокими смазочными, водо- и грязеотталкивающими свойствами, существенно снижают износ и температуру в зоне трения, в том числе в открытых узлах. Образование металлокерамического защитного слоя происходит в результате прохождения реакции замещения ионов магния в узлах кристаллических структур ремонтно-восстановительного состава (РВС) на ионы железа поверхностного слоя стали (чугуна) трущихся поверхностей деталей машин. Образующиеся новые кристаллы имеют более объемные пространственные решетки, которые в своей массе приподнимаются над изношенной поверхностью, компенсируя износ. Толщина металлокерамического защитного слоя зависит от энергии, выделяемой при трении, и количества РВС в местах трения.

Металлоплакирующие смазочные материалы (от франц. *plaquer* – покрывать), пластичные смазки, масла и смазочно-охлаждающие жидкости, в состав которых входят металлсодержащие присадки (порошки металлов, их оксидов, сплавов, солей, комплексных и др. соединений). Металлоплакирующие композиции (реметаллизанты) делят на *порошковые* и *ионные*. Порошковые металлоплакирующие препараты в качестве основного компонента содержат ультрадисперсные порошки, а ионные – маслорастворимые соли пластичных металлов, органические кислоты, мыла, эфиры жирных кислот и спиртов, глицерин. В качестве плакирующих металлов используются медь, олово, цинк, железо, алюминий, свинец, серебро, хром, никель, молибден. Мелкодисперсные порошки (1...3 мкм) применяют в системах, где возможно получение избирательного переноса, а порошки с гранулами размером до 100 мкм применяют в смазочных композициях на базе стандартных пластичных смазок при концентрации от 5 до 60 %.

Реметаллизант – порошковая или ионная добавка на основе пластичных металлов к топливно-смазочным материалам, технологическим и другим сре-

дам, реализующая эффект избирательного переноса при трении. Механизм действия заключается в металлоплакировании трущихся поверхностей вследствие осаждения металлических компонентов, входящих в состав реметаллизантов во взвешенном или ионном виде. При этом частично устраняются микродефекты, снижается коэффициент трения, значительно повышается износостойкость плакированных поверхностей.

Кондиционеры металла – группа препаратов, позволяющих восстановить структуру (состав) металла посредством доставки необходимых компонентов (среды или энергии) от внешних источников. При использовании наблюдается пластифицирование поверхностей трения и формирование на них тончайшего слоя, по свойствам близкого к сервоитной пленке, характерной для эффекта безызносности, что обусловлено избирательным растворением ПАВ, содержащимися в кондиционере, легирующих элементов конструкционного материала детали. Растворенные легирующие элементы и железоорганические соединения кондиционера металла восстанавливают изнашиваемые поверхности, создавая замкнутый трибологический цикл «пассивация (стабилизация) поверхности – износ пленки – растворение (вынос) легирующих элементов – восстановление пленки (осаждение активных элементов кондиционера) – пассивация».

Слоистые модификаторы трения – присадки, состоящие из элементов с низким усилием сдвига между слоями, что позволяет им при трении без особых усилий смещаться (срезаться) вдоль слоев, отделяя трущиеся поверхности от непосредственного контакта. К таким элементам относятся дисульфид молибдена (Mo_2S), трисульфид молибдена (Mo_3S), диселенит молибдена (Mo_2Se), дисульфиды вольфрама (W_2S) и тантала (Ta_2S), графит и некоторые другие. При работе слоистый модификатор заполняет («сглаживает») микронеровности поверхностей трения, вследствие чего снижение коэффициента трения и износа обработанных поверхностей достигает 50 %.

Прирабочные препараты на основе нанодiamondов. Входящие в состав присадок нанодiamondы (диаметром 4...6 нм) и кластерный углерод структурируют масляную пленку, увеличивают ее динамическую прочность, действуют на кристаллическую решетку поверхности металла, упрочняя ее, формируют новые поверхности трения, уменьшая граничное трение и износ (особенно при больших нагрузках и дефиците смазочного материала). В результате сокращается время обкатки и оптимизируется качество трущихся соединений, улучшается работа двигателя, экономится топливо и масло, а также снижаются вредные выбросы и облегчается запуск двигателя.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

2.1. Корпусные детали

Общим конструктивно-технологическим признаком для большинства корпусных деталей является наличие плоской поверхности и двух установочных отверстий, используемых в качестве установочной базы, как при изготовлении, так и при восстановлении деталей данного класса.

В процессе эксплуатации корпусные детали подвергаются химическому, тепловому и коррозионному воздействию газов и охлаждающей жидкости, механическим нагрузкам от переменного давления газов, динамическим нагрузкам, вибрации, контактными нагрузкам, влиянию абразивной среды и т.д. Для данного класса деталей основными видами износа являются коррозионно-механический и молекулярно-механический, которые характеризуются следующими явлениями – молекулярным схватыванием, переносом материала, разрушением возникающих связей, вырыванием частиц и образованием продуктов химического взаимодействия металла с агрессивными элементами среды. При эксплуатации машин в корпусных деталях возможно появление следующих характерных дефектов: механические повреждения (повреждения баз; трещины на стенках и плоскостях разъемов, поверхностях под подшипники и на опорных поверхностях; забоины установочных, привалочных или стыковых поверхностей; обломы и пробоины частей картера; обломы шпилек; забитость или срыв резьбы; выпадание заглушек); нарушение геометрических размеров, формы и взаимного расположения поверхностей (износ посадочных и рабочих поверхностей, резьбы; кавитационный износ отверстий, через которые проходит охлаждающая жидкость; несоосность, неперпендикулярность, нецилиндричность и некруглость отверстий; коробление, или деформация обработанных установочных, привалочных или стыковых поверхностей).

Дефект коробления плоскостей устраняется: шлифованием, когда отклонение от плоскостности более 0,02 мм на длине 100 мм; фрезерованием или шабрением, когда отклонение от плоскостности более 0,2 мм. При этом используют для установки деталей базовые поверхности, созданные на деталях

заводом-изготовителем, восстановленные поверхности или, что реже, изготовленные ремонтным заводом.

Износ внутренних цилиндрических поверхностей в корпусных деталях устраняют растачиванием под ремонтный размер при помощи дополнительных ремонтных деталей с последующей механической обработкой, электрохимических и эпоксидных покрытий, наплавкой и плазменным напылением.

При разработке технологического процесса восстановления корпусной детали придерживаются следующих правил: вначале устраняют трещины, отколы, обломы, затем восстанавливают базовые технологические поверхности, наращивают изношенные поверхности, обрабатывают рабочие поверхности под ремонтный или номинальный размер. При восстановлении деталей определенного наименования необходимо выбрать способ устранения каждого из имеющихся на ней дефектов, а затем, уже, руководствуясь приведенной последовательностью устранения дефектов, проектировать технологический процесс ремонта детали.

2.2. Коленвалы

Дефект 1. Сильный износ и задиры на поверхностях коренных и шатунных шеек коленчатого вала.

Причины: Недостаточное давление в системе смазки; недостаточный уровень масла в картере; некачественное масло; сильный перегрев, приводящий к разжижению масла; попадание в масло топлива (бензина или дизтоплива), приводящее к разжижению масла; засоренный масляный фильтр; работа двигателя на грязном масле.

Действия: Капитальный ремонт двигателя. Шлифовка шеек коленвала в ремонтный размер и установка утолщенных (ремонтного размера) вкладышей. В некоторых случаях – восстановление размеров и формы шеек технологическими методами: напыление, наплавка или замена вала. Проверьте посадочные места под вкладыши коленчатого вала в блоке цилиндров и нижних головок шатунов, системы смазки и масляного насоса и при необходимости отремонтируйте или замените масляный насос. Прочистите, промойте и продуйте масляные каналы блока цилиндров и коленчатого вала. Проверьте системы охлаждения, при необходимости отремонтируйте ее. Проверьте, при необходимости отремонтируйте системы питания.

Дефект 2. Сильный износ торцевых поверхностей под упорные полукольца коленчатого вала.

Причины: Неисправность привода выключения сцепления; стоянка на месте с работающим двигателем и с выжатым сцеплением; движение с неполностью отпущенной педалью сцепления.

Действия: При наличии подобных повреждений коленчатый вал, как правило, ремонтируется обработкой упорных фланцев в ремонтный размер с дальнейшей установкой утолщенных (ремонтного размера) полуколец. В некоторых случаях требуется замена коленчатого вала. Проверьте привод выключения сцепления и в случае неисправности отремонтируйте его. Не держите без необходимости ногу на педали сцепления.

Дефект 3. Царапины на поверхности коренных и шатунных шеек коленчатого вала

Причины: Большой пробег двигателя; попадание посторонних частиц в моторное масло.

Действия: При наличии подобных повреждений коленчатый вал, как правило, ремонтируется шлифовкой шеек в следующий ремонтный размер.

Примечание. Подобные следы являются косвенным признаком износа шеек коленчатого вала. Проверку износа, эллипсности и конусности каждой шейки следует выполнять так: с помощью микрометра промеряем каждую шейку в двух взаимноперпендикулярных плоскостях и сравниваем полученные данные с размерами, предписанными производителем. Если полученный размер выходит за пределы указанных допусков, вал ремонтируется шлифовкой шеек в следующий ремонтный размер.

Дефект 4. Прогиб коленчатого вала.

Действия: Обязательно проверьте изгиб коленчатого вала. Особенно важна эта процедура для двигателей тяжелых грузовиков и строительной техники. Вал укладывается на призмы, установленные на металлической плите. С помощью стрелочного индикатора, установленного на стойке, проверяем прогиб оси коленвала, вращая коленвал. Изгиб не должен превышать: для легковых моторов 0,05 мм; для грузовых моторов 0,1 мм. При необходимости произведите правку ("выпрямление") коленчатого вала. Данная операция поможет выявить наличие трещин.

Дефект 5. Выработка и царапины на поверхности под сальники коленчатого вала.

Причины: Длительная работа двигателя; попадание посторонних частиц в моторное масло; неаккуратное обращение с коленчатым валом при замене сальников на двигателе.

Действия: Замена коленчатого вала. При наличии незначительных царапин возможна шлифовка поверхностей под сальники. При незначительной выработке возможна установка новых сальников с небольшим осевым смещением.

Дефект 6. Разрушение шпоночных пазов и посадочных мест под штифты и втулки.

Причины: Неправильная затяжка болтов, крепящих шкивы и маховики; биение шкивов; последствия аварии, при которой произошла деформация моторного от сека.

Действия: Замена коленчатого вала. В некоторых случаях возможно прорезание нового шпоночного паза или посадочного места под штифт или втулку. При сборке мотора с таким коленвалом требуется особое внимание при совмещении меток на шкивах или шестернях ГРМ.

Дефект 7. Разрушение резьбы в крепежных отверстиях.

Причины: Неправильная затяжка крепежных болтов.

Действия: Замена коленчатого вала. В исключительных случаях возможно нарезание резьбы большего диаметра. Необходимо помнить: после ремонта коленчатый вал должен быть тщательно промыт и продут сжатым воздухом для удаления загрязнений.

2.3. Цилиндры и гильзы цилиндров

В блоке цилиндров двигателя могут появиться такие дефекты, как износ зеркала цилиндров (гильз), царапины и риски на нем; трещины на стенках цилиндров, рубашке охлаждения и головке цилиндров; трещины в перемычках между гильзами и клапанными седлами; износ посадочных мест под гильзы и клапанные седла; образование накали в рубашке охлаждения; отложение нагара на внутренней поверхности головки цилиндров; поломка шпилек и болтов крепления головки цилиндров и срыв резьбы и др.

Пробоины и трещины на зеркале цилиндров и в стенке водяной рубашки появляются в результате замерзания воды или неосторожного обращения с блоком. Нагар образуется в результате неполного сгорания топлива, попадания в него масла из картера и твердых частиц из воздуха. Трещины и пробоины в

стенках рубашки охлаждения заделывают замазкой, штифовой, путем наложения заплат, металлизацией, заваркой, а также эпоксидной пастой.

Методы устранения дефектов: Путем металлизации заделывают трещины, предварительно очищенные, обезжиренные и зазубренные крейцмейселем. Для металлизации используют проволоку из цветных металлов (алюминия или цинка). Заплаты из мягкой листовой стали, латуни или красной меди накладывают на большие трещины или пробоины, укрепляя их болтами. Под заплату ставят прокладку, покрываемую суриком или белилами. Заплаты на пробоях можно прикреплять также заклепками, при этом заплату кладут на матерчатую прокладку, пропитанную суриком. Трещины на рубашках водяного охлаждения чугунного блока можно заваривать латунью с помощью газового пламени без предварительного подогрева блока. Их можно заваривать также медным электродом, обернутым жестью, при электродуговой сварке либо чугунными прутками при газовой сварке, предварительно подогрев блок [19].

2.4. Шатуны

Характерные дефекты шатунов – ослабление посадки втулки в верхней головке, износ втулки в сопряжении с поршневым пальцем, износ нижней головки в сопряжении с вкладышами, износ или повреждение стыковых поверхностей (плоскостей разъема) шатуна и крышки, износ опорных поверхностей под гайку и головку шатунного болта, изгиб или скручивание шатуна. Шатуны ремонтируют при износе втулки верхней головки, превышающем допустимый (предусмотренный в типовой технологии). Втулку растачивают или разворачивают под ремонтный или нормальный размер пальца.

При износе нижней головки шатуна в сопряжении с вкладышами (или он спилен по плоскостям разъема) необходимо восстановить правильную геометрическую форму и нормальный диаметр отверстия. Поверхности разъема шатуна и крышки шлифуют или фрезеруют, снимая минимальный слой металла, достаточный, однако, для того, чтобы при растачивании отверстия вывести следы износа. При любом из этих способов обработки проверяют параллельность плоскостей разъема с образующей отверстия нижней головки. Для проверки пользуются либо глубиномером, либо индикатором, закрепленным в специальной планке, устанавливаемой на плоскостях разъема шатуна, по их концам.

Поверхности разъема должны быть гладкими, лежать в одной плоскости и быть параллельны образующей отверстия с точностью 0,02 мм на их длине.

После этого шатун собирают с крышкой и растачивают (или шлифуют, хонингуют) отверстие нижней головки на нормальный размер. Поскольку с плоскостей разъема снят слой металла, то после растачивания расстояние между осями отверстий верхней и нижней головок шатуна уменьшилось. Восстановить нормальное межосевое расстояние можно за счет эксцентричного растачивания втулки верхней головки шатуна. Можно восстанавливать его также за счет удлинения стержня.

2.5. Поршни

В процессе восстановления поршня устраняют износные повреждения: отверстия под поршневой палец; рабочих поверхностей под поршневое кольцо.

Восстановление включает: очистку поршня, создание технологических баз, изготовление, установку и закрепление дополнительной ремонтной детали (ДРД), точение головки и канавок, обработку юбки, разворачивание отверстия под поршневой палец и контроль восстановленной детали. Для восстановления канавки под верхнее поршневое кольцо применяют ДРД., отверстие под поршневой палец разворачивают под ремонтный размер, а юбку шлифуют до предыдущего ремонтного (или номинального) размера (рис. 4.1).

Центровые отверстия на днище и бобышках выполняют на токарно-винторезном станке в две установки с закреплением поршня за головку специальными кулачками. Последующие операции осуществляют с базированием поршня по выполненным поверхностям.

С торца днища снимают фаску под сварку. Дополнительную ремонтную деталь устанавливают до упора на обработанную поверхность поршня и фиксируют кольцевым сварочным швом, который заполняет пространство между совмещенными фасками поршня и ДРД. Затем подрезают днище, обрабатывают цилиндрическую поверхность головки по длине, снимают фаску и протачивают канавки.

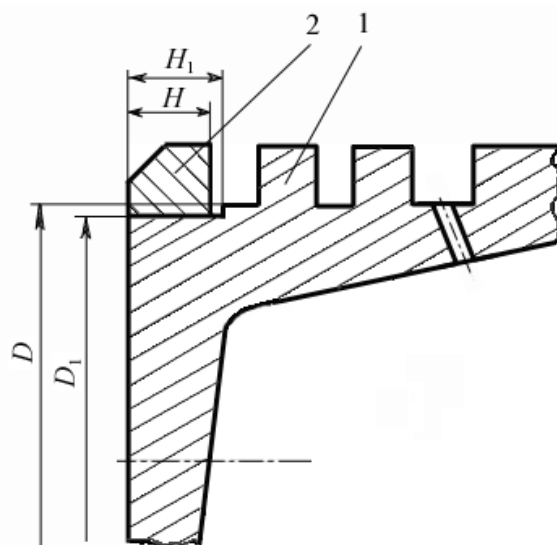


Рис. 4.1. Схема установки дополнительной ремонтной детали (ДРД) при восстановлении канавки под поршневое кольцо:
1 – восстанавливаемый поршень, 2 – ДРД

2.6. Клапаны

Клапаны изготавливают из легированных сталей: впускные – из сталей 40X10C2M, 40X9C2; выпускные – из сталей 40X10C2M, 40X14HB2M, 5X20Г9АН4. Рабочие фаски наплавлены жаростойким сплавом В2К. Стержни клапанов имеют твердость 27...32 HRC, а торцы 42...58 HRC.

Основные повреждения клапанов: износ стержня и фаски, деформация стержня.

Деформированные стержни правят. Восстановительные покрытия наносят на стержень и фаску клапана.

Малое значение диаметра стержня клапана не допускает применения наплавки. Эта причина в сочетании с небольшими износами поверхности обусловила нанесение на нее гальванических покрытий (железнение).

Покрытие на фаску клапана наносят: плазменной наплавкой самофлюсующимися порошками, электродуговой наплавкой сплавами на основе кобальта и никеля, газопорошковой наплавкой самофлюсующимися хромоникелевыми порошками и высокочастотной наплавкой с удержанием расплавленной металла керамической форме.

2.7. Зубчатые колеса

Зубчатые колеса изготавливают из легированных сталей (40X, 18XНВА, 38ХМЮА, 30ХГТ, 20ХНМ и др.). Необходимую поверхностную твердость зубьев обеспечивают химико-термической или термической обработкой (цементацией, азотированием, закалкой и др.).

Характерные повреждения зубьев – усталостные разрушения в виде раковин, уменьшение толщины (при абразивном изнашивании), износ торцов и поломки. У зубчатых колес повреждаются также сопрягаемые элементы с валами, крестовинами, вилками синхронизаторами.

Элементы зубчатых колес восстанавливают заменой венцов, наплавкой, напылением, напеканием и пластическим деформированием.

Венцы зубчатых колес заменяются чаще всего при восстановлении блоков шестерен с несколькими венцами, когда один из них сильно изношен, а остальные находятся в исправном состоянии.

Изношенный венец отжигают и отрезают, а для напрессовывания ДРД протачивают шейку. Толщина венца ДРД (расстояние от окружности впадин до

посадочной поверхности) должна быть $\geq 1...1,25$ высоты зуба. Разрушить изношенный венец можно электроэрозионным способом на станке 4А722, применяя трубчатый электрод.

Материал нового зубчатого венца такой же, как и восстанавливаемой детали. ДРД напрессовывают на блок шестерен и фиксируют двумя-тремя винтами, электродуговой сваркой или полимерами. Нарезка зубьев желательна на напрессованной ДРД.

Венцы с односторонним износом торцевой части зубьев (венцы маховиков) могут быть перевернуты для работы другой стороной. В таком случае ранее не работавшие торцы зубьев должны быть закруглены. В некоторых случаях целесообразно переставлять на другой торец колеса элемент с проточкой для вилки переключения передач. Зубья наплавляют газовой или электродуговой наплавкой. В первом случае применяют присадочные прутки того же состава, что и материал зубчатого колеса. Для наплавки цементированных зубчатых колес служит присадочный материал более высоким содержанием углерода. Если в качестве присадочного материала используют малоуглеродистую сталь, то шестерню цементируют, а затем закаливают. Крупномодульные неточные колеса целесообразно наплавлять железохромистыми электродами типа сормайтa. Наплавку ведут в ванне с водой, чтобы предохранить деталь от перегрева и коробления. Изношенные зубья восстанавливают также нанесением покрытия автоматической наплавкой под слоем флюса. Наплавленные зубья шлифуют абразивными кругами зернистостью 36...46.

Зубья напекают железными порошками по неработающей части зуба и по поверхности выступов (у шестерен масляного насоса).

Пластическое деформирование применяют для восстановления зубчатых колес, изношенных по толщине и имеющих на венце запас металла. Для этого необходимы специальные штампы. Пластическим деформированием восстанавливают как блочные, так и одинарные колеса, если они не имеют поломанных зубьев, сколов и трещин. Вдавливание ведут с нагревом.

В судовом машиностроении успешно применяется технология производства составных азотированных зубчатых колес. Такое колесо обладает повышенной степенью ремонтпригодности [39]

Предметный указатель

- Адсорбция, 178
Азотирование, 180
Алитирование, 192
Алмазное выглаживание, 160
Алюминиевые бронзы, 113
Алюминиевые подшипниковые сплавы, 114
Аналоговое моделирование, 74
Антифрикционность, 140
Антифрикционные материалы, 110
Аустенит, 168
Баббиты, 114
Безабразивная доводка, 69
Безотказность, 35
Безразборное восстановление, 208
Бериллиевые бронзы, 113
Борирование, 186
Бронзографитовые материалы, 116
Бронзы, 112
Вакуумная цементация, 179
Вакуумно-дуговое напыление, 196
Взаимная доводка, 69
Вибрационная ударная обработка, 165
Вибрационное выглаживание, 164
Вибрационное накатывание, 164
Вибрационное обкатывание, 159
Виброгалтовка, 158
Волнистость, 50
Восстановление жесткости, 208
Всплавление, 198
Время эксплуатации при нормальном изнашивании, 25
Выглаживание, 164
Газовая наплавка, 193
Газовая цементация, 179
Газопламенное (газотермическое) напыление, 195
Геомодификаторы, 209
Геотрибология, 209
Глубина резания, влияние на шероховатость, 55
Градуировка средств измерений, 98
Графит, 135
Детонационное напыление, 195
Дефекты в кристаллах, 83
Дислокации, 83
Дислокационная теория трения, 8
Дисульфид вольфрама, 136
Дисульфид молибдена, 135

Дифференциальная термообработка, 177
 Дифференциальное микропрофилирование, 157
 Дифференцированное упрочнение, 148
 Диффузионная металлизация, 191
 Диффузионный отжиг, 170
 Диффузия, 178
 Доводка, 68
 Долговечность, 35
 Дополнение триботехнологического качества, 46
 Дробеструйная обработка, 164
 Дуговая наплавка под флюсом, 193
 Железографит, 116
 Жидкостная цементация, 180
 Заедание, 16
 Закалка, 172
 Закалка объемная, 174
 Закалка поверхностная, 174
 Закалка с самоотпуском, 174
 Закалка токами высокой частоты, 174
 Закон положительного градиента сдвигового сопротивления, 8
 Избирательный перенос, 29
 Избыточность, 44
 Изнашивание, 13
 Изнашивание абразивное, 15
 Изнашивание водородное, 18
 Изнашивание допустимое, 13
 Изнашивание кавитационное, 18
 Изнашивание коррозионно-механическое, 14
 Изнашивание критическое, 13
 Изнашивание окислительное, 14
 Изнашивание эрозионное, 18
 Износ, 19
 Износ предельный, 19
 Износа коэффициент, 19
 Изотермическая закалка, 174
 Изотермический отжиг, 172
 Имитационное моделирование, 74
 Индукционное напыление, 196
 Ионная цементация, 180
 Ионное азотирование, 181
 Ионное легирование, 199
 Испытания материалов, 25
 Испытания ресурсные, 26
 Испытания стендовые, 26
 Испытания ускоренные, 27
 Испытания эксплуатационные, 27
 Каталитическое газовое азотирование, 181
 Катастрофическое изнашивание, 25
 Качество поверхности, 48
 Керамические материалы, 121
 Классификация видов изнашивания, 14
 Классификация видов трения, 5
 Классификация причин отказов, 36
 Классификация узлов трения, 80
 Композиционные материалы, 115
 Композиционные материалы на основе железа, 116
 Композиционные смазочные материалы, 136
 Кондиционеры металла, 210
 Консистенция смазки, 133
 Конструкторские задачи, 139
 Конструкционные смазочные материалы, 132
 Контактная усталость, 16
 Контроль качества, 33
 Контроль качества очистки деталей, 203
 Концентрация напряжений, 56
 Коэффициент Пуассона, 55
 Коэффициент трения, 7
 Кремнистые бронзы, 114

Кривая опорной поверхности, 52
 Кристаллическая решетка, 83
 Критерии заедания, 79
 Критерий макро- и микрогеометрии контактирования, 80
 Критерий подобия, 78
 Критерий согласия, 78
 Критические параметры (изнашивания), 23
 Лазерная закалка, 175
 Лазерная наплавка, 194
 Лазерное поверхностное легирование, 198
 Латуни, 112
 Легкоплавкие подшипниковые сплавы, 114
 Магнитная (ферромагнитная) жидкость, 137
 Магнитоупругий метод определения остаточных напряжений, 68
 Макропрофилирование поверхности трения, 155
 Марганцевые бронзы, 113
 Мартенсит, 169
 Масла гидравлические, 134
 Масла промышленные, 134
 Масла компрессорные, 134
 Масла минеральные, 133
 Масла моторные, 133
 Масла синтетические, 133
 Масла специальные, 134
 Масла технологические, 134
 Масла трансмиссионные, 133
 Масла турбинные, 134
 Математическая модель, 76
 Математическое моделирование, 73
 Материалы консервационные, 134
 Материалы на основе полиамидов, 118

Материалы на основе полиарилатов, 119
 Материалы на основе полиимидов, 119
 Материалы на основе поликарбоната, 119
 Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров, 120
 Материалы на основе фторопласта, 118
 Материалы на основе эпоксидных смол, 119
 Материалы трибосопряжений, 108
 Матрица планирования эксперимента, 76
 Машины трения и износа, 86
 Металлизация, 190
 Металловедение, 82
 Металлографические методы исследования, 84
 Металлоплакирующие смазочные материалы, 209
 Металлорезина, 121
 Металлофизика, 82
 Металлофторопластовые материалы, 117
 Метод Бриннеля, 57
 Метод весовой, 20
 Метод Виккерса, 58
 Метод измерения износа по изменению технических параметров машин, 19
 Метод измерения твердости акустический, 63
 Метод искусственных баз, 21
 Метод микрометрирования, 19
 Метод Мооса, 63
 Метод подобия, 77
 Метод профилографирования, 20
 Метод размерностей, 77
 Метод Роквелла, 57

Метод спектрального анализа, 20
 Метод химического анализа, 20
 Методика косых шлифов, 62
 Методы исследования износостойкости, 25
 Методы определения толщины масляной пленки, 95
 Методы радиометрические, 21
 Механические методы измерения остаточных напряжений, 67
 Микропрофилирование поверхностей трения, 157
 Микроскоп электронный, 85
 Микроскопия световая, 85
 Микроструктура, 84
 Микротвердость, 59
 Минералокерамика, 121
 Моделирование, 70
 Моделирование трибологических процессов, 72
 Модуль Юнга, 55
 Молекулярно-механическая теория трения, 7
 Надежность, 34
 Наплавка, 193
 Наплавка в среде защитного (инертного) газа, 194
 Наплавка электродной лентой под флюсом, 193
 Наполнители, 111
 Напыление, 195
 Напыление в лазерных испарителях, 196
 Напыление в резистивных испарителях, 196
 Наукоемкое изделие, 102
 Неразрушающие методы испытаний, 96
 Несущая способность, 10
 Никель-фосфатирование, 188
 Нитрид бора, 136
 Нитрид кремния, 136
 Нитроцементация, 184
 Нормализация, 176
 Обкатка, 69
 Обобщенные переменные, 78
 Обобщенных переменных метод, 79
 Обработка механической щеткой, 165
 Обработка поверхностей трения абразивом, 154
 Обработка поверхностей трения давлением, 155
 Обработка поверхностей трения резанием, 154
 Обработка холодом, 177
 Обычная закалка, 174
 Оксидирование, 189
 Оловянные бронзы, 113
 Оптимальная пара трения, 43
 Оптимальная структура рабочего слоя, 42
 Основные представления о характере ИП, 29
 Остаточные напряжения, 64
 Отжиг I рода, 170
 Отжиг II рода, 171
 Отжиг для снятия остаточных напряжений, 171
 Отказ, 35
 Отказ внезапный, 35
 Отказ параметрический, 35
 Отказ постепенный, 35
 Отказ функционирования, 36
 Отказов классификация, 35
 Отказы допустимые, 36
 Отказы недопустимые, 36
 Отпуск, 175
 Отпуск высокотемпературный (высокий), 176
 Отпуск низкотемпературный (низкий), 175
 Отпуск среднетемпературный (средний), 176
 Очистное оборудование, 202

ПАВ, 129
Пара трения, 41
Пара трения вспомогательная, 41
Пара трения главная, 41
Пара трения минимального ресурса, 41
Параметр действительный, 33
Параметр нормированный, 33
Параметр оптимизации, 75
Параметр технический, 33
Перлит, 169
Плазменная закалка, 175
Плазменная наплавка, 194
Плазменное напыление, 195
Плакирование, 197
Планирование эксперимента, 74
Площадь контакта контурная, 10
Площадь контакта номинальная, 10
Площадь контакта фактическая, 10
Поверхностное дорнование, 164
Поверхностное легирование, 198
Поверхностное пластическое деформирование, 162
Поверхность, 48
Погрешность, 50
Погрешность формы, 50
Подача, влияние на шероховатость, 55
Подобие, 71
Подобия теория, 72
Подшипниковые (антифрикционные) сплавы, 110
Покрытие, 190
Полимерные материалы, 117
Пористые композитные материалы, 115
Пористые оловянные бронзы, 116
Предварительное смещение, 9
Принцип адаптивности, 46
Принцип адекватности, 46

Принцип дифференцированного распределения триботехнологического качества, 48
Принцип интегральности трибологической системы, 47
Принцип организации процесса трения, 47
Принцип плавающей детали, 143
Принцип резервирования триботехнологического качества, 47
Принцип согласия, 46
Принцип структурной оптимальности контакта, 47
Приработка, 24, 68
Приработочные препараты на основе наноалмазов., 210
Приработочный слой, 69
Присадки, 130
Присадки антиизносные, 131
Присадки антикоррозионные, 130
Присадки антиокислительные, 130
Присадки антифрикционные, 130
Присадки вязкостные, 131
Присадки депрессорные, 131
Присадки многофункциональные, 131
Присадки моюще-диспергирующие, 130
Присадки противозадирные, 131
Присадки противопенные, 131
Притирка, 68
Притирка монолитным алмазным притиром, 69
Притирка с нанесением абразивной пасты на притир, 69
Притирка шаржированным притиром, 69
Прочность, 56
Работоспособность, 35
Равновесная шероховатость, 68

Резервирование, 44
 Резервирование параметрическое, 47
 Резервирование структурное, 47
 Резервирование триботехнологического качества, 45
 Рекристаллизационный отжиг, 171
 Рельеф технологический, 48
 Рельеф эксплуатационный, 49
 Реметаллизант, 209
 Ремонтно-восстановительные составы, 208
 Рентгеноанализ остаточных напряжений, 67
 Рентгеновский структурный анализ, 86
 Самосмазывание, 111
 Сверхтвердые материалы, 117
 Сервоитная пленка, 29
 Сервоитная пленка, механизм образования, 30
 Сила трения, 7
 Силицирование, 186
 Ситаллы, 120
 Склерометрия, 62
 Скорость резания, влияние на шероховатость, 54
 Слоистые модификаторы трения, 210
 Смазка закладная, 126
 Смазка картерная, 126
 Смазочные материалы пластичные (консистентные), 134
 Смазочные материалы твердые, 135
 Смазочные покрытия твердые, 135
 Смазывание кольцом, 127
 Смазывание масловоздушной смесью, 128
 Смазывание масляным туманом, 127
 Смазывание погружением, 127
 Смазывание под давлением, 127
 Смазывание предпусковое, 146
 Смазывание проточное, 126
 Смазывание циркуляционное, 126
 Смятие, 17
 Спеченные антифрикционные материалы, 115, 141
 Сплавы с памятью формы, 122
 Статический контакт, 9
 Структурно-энергетическая теория трения, 8
 Ступенчатая закалка, 174
 Сульфидирование, 184
 Сульфоцианирование, 185
 Схватывание I рода, 15
 Схватывание II рода, 15
 Схема процесса очистки, 202
 Схемы трения, 86
 Тарировка, 98
 Твердость, 56
 Твердые сплавы, 117
 Термическая обработка, 168
 Термическое вакуумное напыление, 195
 Термомеханическая обработка металлов, 177
 Техника, 34
 Технические моющие средства, 202
 Технологические факторы и их влияние на шероховатость, 54
 Технология, 40
 Титановое антифрикционное оксидирование, 185
 Толщина покрытия критическая, 190
 Топография поверхности трения, 48
 Точность, 98

Трение, 5
 Трение в вакууме, 5
 Трение граничное, 6
 Трение жидкостное, 6
 Трение качения, 7
 Трение качения с проскальзыванием, 7
 Трение скольжения, 7
 Трение со смазкой, 6
 Трение сухое, 5
 Третье тело, 9
 Трибологическая система, 11
 Трибология, 39
 Триботехника, 40
 Триботехнологии принципы, 44
 Триботехнологическая надежность, 99
 Триботехнологическая рентабельность, 44
 Триботехнологическое качество, 44
 Триботехнологичность, 102
 Триботехнология, 39
 Трибоэлектричество, 11
 Углеграфитовые материалы, 118
 Ударное раскатывание, 165
 Улучшение, 176
 Ультразвуковая обработка, 165
 Упрочнение, 162
 Упрочнение и выглаживание трением верчения, 160
 Упрочняющая чеканка, 165
 Упрочняющее обкатывание, 163
 Упрочняющее раскатывание, 163
 Условия возникновения ИП в узлах трения, 30
 Усталостная выносливость, 208
 Установившееся движение, 9
 Феррит, 168
 Феррогидродинамика, 138
 Физические газоконденсационно-вакуумные методы, 199
 Физическое моделирование, 72

Финишная антифрикционная безабразивная обработка, 197
 Фланкирование, 156
 Фосфатирование, 188
 Фреттинг-процесс, 17
 Фрикционно-упрочняющая обработка, 199
 Фрикционные материалы, 120
 Фталоцианины, 136
 Фторопласт, 118
 Химико-термическая обработка, 178
 Химические газоконденсационные методы, 199
 Хонингование алмазное плосковершинное, 157
 Хонингование антифрикционно-деформационное, 158
 Хонингование антифрикционное плосковершинное, 158
 Хромирование, 191
 Цементация, 178
 Цементация в кипящем слое, 180
 Цементит, 169
 Центробежная обработка, 165
 Цианирование, 184
 Цинкование, 192
 Цинковые антифрикционные сплавы, 114
 Чугун, 108
 Шарпи принцип, 122
 Шероховатость, 50
 Шлиф, 84
 Эвтектические покрытия, 199
 Эксперимент, 74
 Эксперимент активный, 75
 Эксперимент неполный, 74
 Эксперимент пассивный, 75
 Эксперимент полный факторный, 74

Экспериментально-расчетные
методы оценки износостойкости,
26
Экспресс-методы определения
износостойкости материалов, 26
Эластогидродинамическая
смазка, 6
Эластогидродинамическая теория
трения, 6
Эластомеры, 118
Электрогидравлический эффект,
167
Электрогидравлическое
упрочнение, 166
Электродуговая наплавка, 194
Электродуговое упрочнение, 187
Электроискровое легирование,
198

Электроискровое упрочнение,
187
Электролитическое железнение,
188
Электролитическое
никелирование, 188
Электролитическое
хромирование, 187
Электроннолучевое легирование,
198
Электронно-лучевое напыление,
196
Электронно-микроскопические
исследования, 85
Электрошлаковая наплавка, 194
Эффект Ребиндера, 29, 129
Ювенильная поверхность, 6
Юстировка, 98

Список использованной литературы

1. **Soloviev S.N.** Tribotechnology is a new trend of improved quality and reliability of mechanical systems. 3-rd International Tribology Congress (Eurotrib) vol.IV/A (Other tribological problems) p.221-224 21st to 27th September 1981, Varszawa - Poland. The Polish Tribology Connsel Technical University – Radom.
2. **Беркович, И.И.** Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский // Учебник для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
3. **Браун, Э.Д.** Трение и изнашивание в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А.Евдокимов, А.В.Чичинадзе // М.: Машиностроение, 1982. – 190 с.
4. **Веников, В.А.** Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников / М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
5. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность). Учебник – 4-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов // М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
6. **Дроздов, Ю.Н.** и др. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов // М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
7. **Испытательная техника:** Справочник, В 2-х кн./ Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1982 – Кн. 1. 1982 – 528 с.
8. **Испытательная техника:** Справочник, В 2-х кн./ Под ред. В.В.Ключева. – М.: Машиностроение, 1982 – Кн. 2. 1982 – 560 с.
9. **Клименко, Л.П.** Повышение долговечности цилиндров ДВС на основе принципов переменной износостойкости / Л. П. Клименко. Под ред. В.В. Запорожца. // Николаев: НФ НаУКМА, 2001. – 294 с.
10. **Когаев, В.П.** Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов // М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
11. **Костецкий, Б.И.** Испытание металлов на износ (методы и машины) / Б.И. Костецкий, Г.А. Прейс, В.Д. Елисеев // Киев: МАШГИЗ, киев. отд-ние, 1955. – 127 с.

12. **Костецкий, Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий // К. : «Техника», 1970, 396 с.
13. **Крагельский, И.В.** Узлы трения машин. Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин // М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
14. **Маталин А.А.** Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техніка, 1971. – 144 с.
15. **Машины** и стенды для испытаний деталей/ Под ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.
16. **Обеспечение** износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок. Методический указания Госстандарта СССР. М.: Изд-во Госстандарта, 1980. – 60 с.
17. **Овсеенко, А.Н.** Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. Монография / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек // М. : «Янус-к», 2003. – 296 с.
18. **Орлов, П.И.** Основы конструирования / П.И. Орлов // Справочно-методическое пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. В 3-х кн. М.: Машиностроение, 1977 – Кн. 1. – 623 с.; Кн. 2. – 574 с.; Кн. 3. – 360 с.
19. **Пантелеенко, Ф.И.** Восстановление деталей машин. Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов // М: Машиностроение, 2003. – 672 с.
20. **Повышение** износостойкости на основе избирательного переноса / Под. ред. Д.Н. Гаркунова // М. : «Машиностроение», 1977. – 215 с.
21. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
22. **Радіонов, О.В.** Систематизація найбільш доцільних галузей використання магніторідинних ущільнень / О.В. Радіонов, О.М. Виноградов // Вісті Академії Інженерних наук України – 2003, - №1 – С.3-8.
23. **Рыжов, Э.В.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов // Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
24. **Снеговский, Ф.П.** Режимы жидкостного трения в трибосистемах машин / Ф.П. Снеговский // Проблемы трибологии (Problems of Tribology), № 2, 2002. – с. 52-56.
25. **Снеговский, Ф.П.** Стенд для испытания подшипников / Ф.П. Снеговский, А.Е. Горкуша, А.П. Гуня и др. // Вестник машиностроения, № 9, 1980. – с. 17-19.
26. **Соловйов, С.М.** Основи наукових досліджень / С.М. Соловйов // К. : Центр учбової літератури. 2007. – 176 с.
27. **Соловйов, С.М.** Порівняльний аналіз техніко-економічних і екологічних показників хіміко-термічної обробки / С.М. Соловйов, О.В. Трофимова, С.Ж. Боду // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Т. 61. Вип.. 48. Техногенна безпека. Миколаїв: Вид-во МДГУ ім.. П.Могили, 2007. – с. 74-76.
28. **Соловьев, С.Н.** Глубинные процессы повреждаемости контакта качения с проскальзыванием при переменном нагружении / С.Н. Соловьев // Проблемы трибологии, 2003, № 2. – С. 58-64.
29. **Соловьев, С.Н.** К назначению посадок и зазоров цилиндропоршневых сопряжений герметичных компрессоров / С.Н. Соловьев, С.Ж. Боду // Двигатели внутреннего сгора-

- ния. Всеукраинский научно-технический журнал. – Харьков, НТУ «ХПИ», № 2, 2010. – С. 127-129.
30. **Соловьев, С.Н.** Металлографическая и дислокационная картина при многократной пластической деформации металла / С.Н. Соловьев, С.К. Стронский // Технология судового машиностроения и обработка металлов резанием. Труды НКИ. Вып. 43. Часть II, Николаев, НКИ, 1971. – с. 40-44.
 31. **Соловьев, С.Н.** Методы и оборудование исследования тяжело нагруженных узлов трения / С.Н. Соловьев // Проблемы трибології, 2003, № 1. – С. 3-15.
 32. **Соловьев, С.Н.** Обеспечение работоспособности тяжело нагруженных опор судовых устройств / С.Н. Соловьев, С.Г. Бирюков, В.А. Мозолюк, В.П. Шеремет // Технология судового машиностроения. Труды НКИ. Николаев, НКИ, 1990. – с. 38-45.
 33. **Соловьев, С.Н.** Отработка наукоемкого изделия на триботехнологичность / С.Н. Соловьев, С.Ж. Боду // Проблемы трибологии. Международный научный журнал. Хмельницкий: Изд-во Хмельницкого национального университета. № 2, 2009. С. 81-85.
 34. **Соловьев, С.Н.** Планирование и анализ экспериментов / С.Н. Соловьев // Николаев, НУК, 2012. – 96 с.
 35. **Соловьев, С.Н.** Практические аспекты создания магнитных масел / С.Н. Соловьев, Е.В. Трофимова // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології», Хмельницький: ХНУ, 2012. – № 3. – С. 32-35.
 36. **Соловьев, С.Н.** Прогнозирование долговечности подшипников методами теории подобия. Prognoziranje veka trajanja ležišta metodama teorija sličnosti. Zbornik radova naučnog stručnog skupa o zupčanicima i kliznim ležajima održanog u Zagrebu od 22-24.01.1976. Zagreb, 1976. – с. 195-209.
 37. **Соловьев, С.Н.** Прогнозирование заедания тяжело нагруженных узлов судовых ТЗА методами подобия / С.Н. Соловьев, В.П. Шеремет // Судовое энергомашиностроение. Труды НКИ. Вып. 156. Николаев, НКИ, 1980. – с. 49-52
 38. **Соловьев, С.Н.** Прогнозирование надежности трибосистем, работающих в экстремальных условиях / С.Н. Соловьев // Проблемы трибологии, 2003, № 2. – С. 27-34.
 39. **Соловьев, С.Н.** Проектирование, изготовление и исследование составных азотированных зубчатых колес для быстроходных тяжело нагруженных редукторов / С.Н. Соловьев // Вестник машиностроения, № 2, 2003. – С. 114-118.
 40. **Соловьев, С.Н.** Размерно-точностные расчеты в машиностроении / С.Н. Соловьев, Т.Н. Чередниченко // Николаев, НУК, 2014. – 158 с.
 41. **Соловьев, С.Н.** Триботехнологические принципы создания долговечной техники / С.Н. Соловьев // Труды международной научной конференции «Трение, износ и смазочные материалы», Ташкент, 22-26 мая, 1985. – с. 67-72.
 42. **Соловьев, С.Н.** Управление несущей способностью трибосистем методами макропрофилирования рабочих поверхностей / С.Н. Соловьев // Проблемы трибологии, 2004, № 2. – С. 10-14.
 43. **Справочник по триботехнике** / Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

44. **Справочник по триботехнике:** В 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
45. **Трение**, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
46. **Триботехнология:** Словарь-справочник / С.Н.Соловьев, Л.П.Клименко, С.Ж.Боду, Е.В.Трофимова; Под общ. ред. С.Н.Соловьева. – Николаев: Изд-во НГГУ им. П.Могила, 2003. – 384 с.
47. **Чеповецкий, И.Х.** Триботехнология формирования поверхностей / И.Х. Чеповецкий, С.А. Ющенко, А.В. Бараболя и др. // АН УССР, Ин-т сверхтвердых материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
48. **Чернец, М.В.** Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии: В 3 т. / Под общ. ред. М.В. Чернеца, Л.П. Клименко. – Т. 1. Механика трибоконтактного взаимодействия при скольжении. – Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могила, 2006. – 476 с.
49. **Шевеля, В.В.** Фреттинг-усталость металлов / В.В. Шевеля, Г.С. Калда // Хмельницкий: Поділля, 1998. – 299 с.
50. **Шевченко, Д.Д.** Гидродинамический радиальный подшипник скольжения с некруговой поверхностью вкладыша / Д.Д. Шевченко, С.Н. Соловьев, М.А. Черемушева // Теплоэнергетика. Труды НКИ. Вып. 83, Николаев, НКИ, 1974. – с. 68-73.
51. **Шеремет, В.П.** Исследование противозадирной стойкости косозубых передач и упорных гребней // В.П. Шеремет // Сборник научных трудов. – Николаев, НКИ, 1979, вып. 155, с. 65-71.
52. **Школьников, В.М.** Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник / В.М. Школьников // Издательский центр Техинформ, Москва, 1999 г., – 596 стр.
53. **Шнейдер, Ю.Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер // Л.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
54. **А. с. 1250882 СССР.** Устройство для испытания подшипников скольжения/С.Н. Соловьев, В.П. Шеремет, С.Г. Бирюков и В.А. Мозолюк (СССР). – Заявлено 16.11.84; Опубл. 15.08.86. Бюл. № 30.
55. **Патент ФРГ.** Номер охранного документа № 3728239. Система смазки компрессора / С.Н. Соловьев, Н.П. Стрижак, С.Н. Блиндер и др. (СССР) – Заявлено 25.08.87; Опубл. 05.10.89.
56. **Патент Швеции.** Номер охранного документа № 8703134-0. Система смазки компрессора / С.Н. Соловьев, Н.П. Стрижак, С.Н. Блиндер и др. (СССР) – Опубл. 02.02.89. Номер публикации – 456439.

Рекомендуемая литература

1. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность). Учебник – 4-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов // М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
2. **Костецкий, Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий // Киев: Техніка, 1970. – 396 с.
3. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
4. **Маталин, А.А.** Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин // Киев: Техніка, 1971. – 144 с.
5. **Рыжов, Э.В.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов // Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
6. **Силин, А.А.** Трение и мы / А.А. Силин // М.: Наука 1987. – 192 с.,
7. **Соловьев, С.Н.** Основы технологии судового машиностроения. 2-е изд., перераб. и доп. / С.Н. Соловьев // Л.: Судостроение: 1983. – 360 с.
8. **Справочник по триботехнике:** В 3 т. Т. 1. Теоретические основы/ Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
9. **Справочник по триботехнике:** В 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения/Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
10. **Триботехнология:** Словарь-справочник / С.Н.Соловьев, Л.П.Клименко, С.Ж.Боду, Е.В.Трофимова; Под общ. ред. С.Н.Соловьева. – Николаев: Изд-во НГГУ им. П.Могила, 2003. – 384 с.
11. **Чеповецкий, И.Х.** Триботехнология формирования поверхностей / И.Х.Чеповецкий, С.А. Ющенко, А.В. Бараболя и др. // АН УССР, Ин-т сверхтвердых материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
ЧАСТЬ I. ПРИНЦИПЫ ТРИБОТЕХНОЛОГИИ	5
ГЛАВА 1. МЕХАНИКА ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	5
1.1. Трибологическая система (ТС). Входные величины, выходные величины, структура и состав ТС.....	5
1.2. Основные закономерности и методы исследования процесса изнашивания	22
1.3. Эффект избирательного переноса при трении.....	29
ГЛАВА 2. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	33
2.1. Понятие надежности трибологической системы. Применяемые показатели работоспособности и трибологической надежности.....	33
2.2. Классификация причин отказов по стадиям создания новой тех- ники.....	36
ГЛАВА 3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ТРИБОТЕХНОЛОГИИ	39
3.1. Машина с позиций триботехнологии	41
3.2. Триботехнологические принципы создания новой техники	44
3.3. Технологическая и эксплуатационная эволюция качества поверх- ности, его основных характеристик и состояния	48
3.4. Обеспечение оптимальной контурной площади и шероховатости пар трения. Приработка.....	68

ЧАСТЬ 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
Триботехнологического качества.....	70
ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В	
Узлах трения и фрикционных соединениях	70
1.1. Физическое и математическое моделирование трибологических	
явлений.....	70
1.2. Классификация узлов трения по трибологическому признаку. Мо-	
делирование трибологических процессов в типичных узлах трения.....	80
1.3. Методы и оборудование для оценки трибологических характери-	
стик поверхностей трения и смазочных материалов	82
ГЛАВА 2. ОТРАБОТКА ИЗДЕЛИЯ НА ТРИБОТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ.....	99
2.1. Принципы создания долговечных пар трения. Жизненный цикл	
изделия. Обеспечение триботехнологической надежности	99
2.2. Основные этапы отработки изделия на триботехнологичность	103
Глава 3. МАТЕРИАЛЫ ТРИБОСИСТЕМ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ	
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ.....	108
3.1. Основные материалы трибосопряжений и узлов трения.....	108
3.2. Смазывание и смазочные материалы.....	124
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ	
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ПАР ТРЕНИЯ	139
4.1. Задачи конструктора в повышении долговечности и надежности	
узлов трения.....	139
4.2. Оценка и выбор схемы узла трения	139
4.3. Выбор материалов пары трения	140
4.4. Критерии работоспособности материалов в парах трения.....	141
4.5. Использование принципа плавающих деталей.....	142
4.6. Замена внешнего трения внутренним трением упругого элемента...	143
4.7. Замена трения скольжения трением качения.....	144
4.8. Выбор зазоров в сопряжениях	145
4.9. Снижение уровня контактных напряжений	145
4.10. Обеспечение граничного трения вместо сухого или полусухого....	146
4.11. Противодействие схватыванию поверхностей	147
4.12. Обеспечение одинакового износа элементов.....	148
4.13. Компенсация износа	148
4.14. Способы защиты рабочих поверхностей пар трения от загрязне-	
ний	150

ЧАСТЬ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАР ТРЕНИЯ	151
ГЛАВА 1. МАКРО- И МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ, ВЫБОР МЕТОДА	151
1.1. Формообразование рабочих поверхностей деталей механических систем	151
1.2. Макропрофилирование поверхностей трения	155
1.3. Микропрофилирование поверхностей трения. Принципы, выбор метода	157
ГЛАВА 2. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ	162
2.1. Явления, происходящие в поверхностном слое при обработке дета- лей ППД	162
2.2. Методы выполнения ППД.....	163
2.3. Электрогидравлическое упрочнение	166
ГЛАВА 3. ТЕРМИЧЕСКОЕ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕ- НИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ.....	168
3.1. Термическая обработка	168
3.2. Химико-термическая обработка.....	178
3.3. Электрохимические и химические методы	187
ГЛАВА 4. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ.....	190
4.1. Диффузионная металлизация	191
4.2. Наплавляемые покрытия	193
4.3. Напыляемые покрытия	195
4.4. Плакирование	197
4.5. Методы ФАБО.....	197
4.6. Поверхностное легирование	198
4.7. Фрикционно-упрочняющая обработка	199
ЧАСТЬ 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕ- СТВА В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА.....	200
ГЛАВА 1. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ	200
1.1. Основные этапы восстановления	200
1.2. Восстановление износостойкости, усталостной выносливости и жесткости	206

1.3. Технология восстановления изношенных деталей без разборки узлов	208
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС	211
2.1. Корпусные детали	211
2.2. Коленвалы	212
2.3. Цилиндры и гильзы цилиндров	214
2.4. Шатуны	215
2.5. Поршни	216
2.6. Клапаны	217
2.7. зубчатые колеса	217
Предметный указатель	219
Список использованной литературы	227
Рекомендуемая литература	231

Соловйов С. М.

С 60 Основи триботехнології : навчальний посібник / С. М. Соловйов, С. Ж. Боду, О. В. Трофимова ; під заг. ред. С. М. Соловйова. – Миколаїв : НУК, 2018. – 236 с.

ISBN 000–000–000–000–0

У навчальному посібнику викладено відомості про теоретичні та експериментальні основи тертя, зношування і змащування з позицій нового науково-технічного напрямку – триботехнології машинобудування. Сформульовані основні положення і принципи триботехнології, викладена методологія відпрацювання виробів на триботехнологічність. Особливу увагу приділено ряду практичних методів вирішення триботехнологічних завдань, в тому числі конструкторським методам і технологічним процесам створення триботехнологічної якості робочих поверхонь і контактів пар тертя.

Для студентів, аспірантів, інженерів, що займаються вивченням, розробкою, виготовленням і експлуатацією машин.

Наукове видання

СОЛОВЙОВ Станіслав Миколайович

БОДУ Світлана Жаківна

ТРОФИМОВА Олена Валеріївна

ОСНОВИ ТРИБОТЕХНОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Під загальною редакцією С.М. Соловйова

(російською мовою)

Макетування *В. Г. Мазанко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 14,7. Тираж 000 прим. Вид. № 000. Зам. № 000.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.