

С.А. ЗАГАЙКО

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Уфа 2011

Министерство образования и науки РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

С. А. ЗАГАЙКО

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве конспекта лекций для студентов всех форм обучения,
обучающихся по направлению 140500 "Энергомашиностроение",
специальности 140501 "Двигатели внутреннего сгорания"*

Уфа 2011

УДК 621.89(07)
ББК 34.41(я7)
З-14

Рецензенты:

*ген. директор ООО "ХТЦ УАИ", д-р техн. наук Шолом В.Ю.,
начальник КО ОАО УМЗ Гареев Р.Р.*

Загайко, С.А.

З-14 Основы теории трения и изнашивания: конспект лекций /
С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т.– Уфа: УГАТУ,
2011. – 102 с.

ISBN 978-5-4221-0178-8

Конспект лекций предназначен для подготовки бакалавров по направлению 140500 – "Энергомашиностроение" и подготовки дипломированных специалистов по специальности 140501 – "Двигатели внутреннего сгорания" в рамках дисциплины по выбору "Основы теории трения и изнашивания".

Рассматривается физическая сущность процессов трения и изнашивания в парах узлов и агрегатов энергомашиностроения и приведены математические модели расчета коэффициентов трения и интенсивности изнашивания при различных режимах нагружения.

Табл. 2. Ил. 19. Библиогр.: 11 назв.

УДК 621.89(07)
ББК 34.41(я7)

ISBN 978-5-4221-0178-8

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2011

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

- КПК – контурная площадь контакта;
НПК – номинальная площадь контакта;
ФПК – фактическая площадь контакта;
ПАВ – поверхностно-активные вещества;
 A_a – номинальная площадь контакта, м²;
 A_c – контурная площадь контакта, м²;
 A_r – фактическая площадь контакта, м²;
 P_a – номинальное давление на контакте, Па;
 P_c – контурное давление на контакте, Па;
 P_r – фактическое давление на контакте, Па;
 E – модуль упругости материала поверхности, Па;
 μ – коэффициент Пуассона материала;
 $HВ$ – твердость материала по Бринеллю, Па;
 α_r – коэффициент гистерезисных потерь;
 τ_0 – сдвиговое сопротивление (фрикционный параметр), Па;
 β – коэффициент упрочнения молекулярной связи;
 Δ – характеристика шероховатости поверхности;
 K_B – коэффициент волнистости поверхности;
 K_W – коэффициент учета высоты волны;
 R_W – радиус волны микронеровностей, м;
 b, ν – параметры степенной аппроксимации кривой опорной поверхности;
 δ – коэффициент формы пары трения;
 η – мгновенная динамическая вязкость смазки, Па·с;
 α – пьезокоэффициент вязкости смазочного материала, мм²/Н;
 R_B, H_B, S_B – радиус, высота и шаг волны микронеровности;
 f_a – молекулярная составляющая коэффициента трения;
 f_m – механическая составляющая коэффициента трения.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Трибология (от греч. *tribo* – растираю, *logos* – наука) – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазывания машин. Данный термин является международным. Как синоним трибологии в литературе встречается термин "трибоника", предложенный школой Крагельского И. В.

Триботехника – рассматривает приложения трибологии в технике. Термин ввел Гаркунов Д. Н. Среди российских трибологов под ним понимается прикладное использование фундаментальных основ трибологии.

Трибохимия – изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Она исследует проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса и воздействие на поверхность деталей химически активных веществ, выделяющихся при трении вследствие деструкции полимеров или смазочного материала.

Трибофизика – изучает физические аспекты взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении.

Трибомеханика – изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Она рассматривает законы рассеяния энергии, импульса, а также механическое подобие, релаксационные колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и др. применительно к задачам трения, изнашивания и смазывания.

В трибологии можно выделить следующие направления ее развития [1]:

- 1) учение о площадях фактического контакта;
- 2) исследование сухого и граничного трения скольжения и качения, создание расчетных методов;
- 3) гидрогазодинамика и эластогидродинамика трения;
- 4) исследование износа и его расчеты;
- 5) теплофизика и тепловая динамика трения и износа;
- 6) триботехническое материаловедение;
- 7) физико-химическая механика контактного взаимодействия (с учетом среды);
- 8) составление банков данных по трению и износу.

В технической литературе встречается термин *динамическое металловедение* – это раздел металловедения, изучающий структуру и свойства поверхностных слоев металлов и сплавов в процессе трения.

Ряд терминов, относящихся к трибологии, стандартизован. ГОСТ 23.002–78 [2] включает 98 терминов, которые классифицированы по видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам.

К общим понятиям трибологии относятся следующие термины [1, 3].

Абсорбция – объемное поглощение вещества жидкостью или твердым телом.

Адгезия (прилипание) – возникновение молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных (твердых, жидких) тел (фаз). Является результатом межмолекулярного взаимодействия, ионной или металлической связи.

Адсорбция – концентрация жидкостей или газообразных веществ (адсорбатов) на поверхностях твердых тел или жидкостей (адсорбентов), происходящая в результате взаимодействия полей адсорбента и адсорбата.

Аэродинамические потери – потери на трение, расходуемые на преодоление сопротивления воздуха механизмами двигателя.

Внешнее трение (или просто трение) – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Внутреннее трение – явление сопротивления относительно перемещению частей одного и того же тела.

Волнистость (поверхности) – характеристика поверхности, определяемая совокупностью регулярно чередующихся и близких по размерам возвышений и впадин, образующихся при механической обработке материалов из-за неравномерности усилий резания и колебаний в системе станок – инструмент – изделие.

Вырывание – отторжение конгломератов материала неправильной формы от поверхности трения. Обычно происходит при схватывании.

Гидравлические потери – составляющие насосных потерь, связанные с движением рабочего тела через двигатель, включая ком-

прессор и турбину, и вызываемые трением в пограничном слое, вихреобразованием и т.д.

Гидродинамическая смазка – жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется вследствие давления, возникающего в слое жидкости при относительном движении этих поверхностей.

Градиент механических свойств – вектор, характеризующий изменение механических свойств элемента пары трения по нормали к поверхности трения. При положительном градиенте механических свойств возникает внешнее трение, при отрицательном – заедание, схватывание, глубинное вырывание.

Граничная смазка – смазка, при которой трение определяется свойствами тонкого слоя компонентов жидкого смазочного материала, отличающимися от свойств того же смазочного материала в объеме и обусловленными взаимодействием материала поверхностей трения, смазочного материала и среды.

Граничные слои (масляной пленки) – слои, возникающие в результате адсорбции полярных молекул углеводородов на поверхности твердых тел (металлов) под воздействием поля твердой фазы.

Жидкостная смазка – смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется жидким смазочным материалом.

Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения. Задир является одним из видов катастрофического износа.

Заедание – процесс возникновения и развития повреждений поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала. Наблюдается при нарушении правила положительного градиента механических свойств.

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Износ может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое

величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Индекс вязкости – безразмерная величина, определяемая по установленной шкале и характеризующая изменение вязкости масла в зависимости от температуры.

Индикаторные потери – потери, связанные с преобразованием теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, в силу, действующую на перемещающийся поршень; включают термодинамические потери и потери, связанные с реализацией действительного цикла; учитываются индикаторным КПД.

Истирание – удаление слоев материала за счет его изнашивания при внешнем трении скольжения.

Качение – процесс, при котором поверхности соприкасающихся и взаимно перемещающихся без скольжения тел непрерывно меняют участки контакта при повороте одного или обоих тел относительно постоянных или мгновенных осей.

Качение с проскальзыванием – разновидность качения двух тел относительно друг друга, когда чистое качение в отдельные промежутки времени сопровождается (прерывается) скольжением.

Когезия (сцепление) – молекулярное взаимодействие частичек твердого тела, при котором происходит соединение с наибольшей прочностью. Когезия металлов используется при сварке трением.

Контртело – элемент пары трения, работающий совместно с материалом трения.

Контурная площадь касания – площадь, образованная в местах касания объемным смятием тел, обусловленным волнистостью.

Коррозия (при трении) – разрушение материалов пары трения вследствие их химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой.

Коэффициент сцепления – отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной относительно поверхностей трения силе, прижимающей тела друг к другу.

Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу. В зависимости от вида движения различают коэффициент *трения качения* и *трения скольжения*.

Материал трения – материал, используемый или предназначенный для работы в условиях трения, чаще всего скольжения.

Механические потери – потери, связанные с преобразованием внутренней энергии рабочего тела, действующего на поршень, в работу на валу двигателя, включают потери на преодоление трения в двигателе и на приведение в действие устройств, обслуживающих двигатель; учитываются механическим КПД.

Молекулярная составляющая силы трения (адгезионная) – составляющая силы трения, которая учитывает атомные и молекулярные взаимодействия при сближении поверхностей и их последующем относительном перемещении.

Мощность трения – отношение работы трения к времени скольжения.

Наволакивание (намазывание) – явление переноса вещества с одной контактирующей при трении поверхности на другую.

Наибольшая сила трения покоя – сила трения покоя, любое превышение которой ведет к возникновению движения.

Насосные потери – составляющие индикаторных потерь, связанные с осуществлением газообмена.

Номинальная площадь контакта – площадь, заданная в технической документации без учета допускаемых отклонений.

Отслаивание – процесс отделения от поверхности трения материала в виде чешуек при усталостном изнашивании.

Пара трения (фрикционная пара) – система из двух элементов (материалов), соприкасающиеся поверхности которых в процессе работы перемещаются (скользят) относительно друг друга.

Питтинг – любое удаление или перемещение материала, приводящее к образованию на поверхности детали углублений и ямок. Обычный вид разрушения рабочих поверхностей элементов подшипников качения.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) – вещества, молекулы или ионы которых концентрируются под действием молекулярных сил (адсорбция) у поверхности раздела фаз, вызывая понижение поверхностного натяжения.

Поверхность трения – поверхность тела, участвующая в трении.

Полужидкостная смазка – смазка, при которой жидкий смазочный материал, передающий нагрузку, частично разделяет поверхности трения деталей, находящихся в относительном движении.

Потери на взбалтывание – потери на трение при взбалтывании масла в картере двигателя.

Потери на привод вспомогательных агрегатов – механические потери на привод вспомогательных агрегатов двигателя.

Потери на трение – механические потери на преодоление сил трения в двигателе без учета потерь на преодоление сил трения во вспомогательных агрегатах.

Предварительное смещение – относительное микроперемещение двух твердых тел при трении в пределах перехода от состояния покоя к относительному движению.

Прирабатываемость – способность трущихся тел в начальный период трения постепенно улучшать контактирование поверхностей за счет их сглаживания, что при постоянных внешних условиях сопровождается снижением коэффициента трения, интенсивности изнашивания и уменьшением тепловыделения.

Приработка – процесс изменения шероховатости поверхности трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении работы трения и интенсивности изнашивания.

Присадки (добавки) – вещества, добавляемые в незначительных количествах к топливам, смазочным материалам и специальным жидкостям для придания им новых свойств или с целью изменения существующих. Применяют присадки вязкостные, депрессорные, антиокислительные, термоокислительные, антиржавейные, моющие, диспергирующие, противоизносные, противозадирные, противопенные, приработочные, противодымные, антистатические и др.

Путь трения – путь, который проходит тело от начала предварительного смещения до полной остановки.

Пятно касания – элемент фактической площади контакта, на котором происходит действительное контактирование двух твердых тел.

Рабочий рельеф (детали трения) – микрошероховатость, образующаяся в процессе трения к концу периода приработки детали.

Равновесная шероховатость – шероховатость поверхности деталей узла трения, сформировавшаяся после периода приработки и характерная для заданных условий трения, которая в дальнейшем не изменяется и воспроизводится в процессе трения.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внеш-

ней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами.

Сила трения покоя – сила трения, соответствующая началу относительного движения.

Скольжение – движение двух тел относительно друг друга, при котором их скорости на общем участке поверхности контакта различны по значениям или направлениям.

Скорость скольжения – разность скоростей тел в точках касания при скольжении.

Скорость изнашивания – отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник.

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Смазочная способность – свойство смазочного материала снижать износ и силу трения, не зависящее от его вязкости.

Смазочное действие – проявление смазочной способности, которое определяется механическими (реологическими), химическими и поверхностными свойствами смазочных материалов.

Смазочные свойства (масел и смазок) – свойства, характеризующие способность смазочного материала улучшать работоспособность поверхности трения путем максимального уменьшения износа и трения.

Смазочный материал – материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Смазывание – подведение смазочного материала к поверхности трения.

Среднее давление механических потерь – работа, затрачиваемая на преодоление трения в двигателе и на приведение в действие устройств, обслуживающих двигатель, отнесенная к единице рабочего объема.

Среднее давление потерь, определенное прокруткой – характеристика потерь, определенная методом прокрутки двигателя от постороннего источника; представляет сумму среднего давления механических потерь и среднего давления насосных потерь.

Среднее давление потерь на трение – работа, затрачиваемая на преодоление трения в двигателе, отнесенная к единице рабочего объема.

Схватывание – местное соединение двух твердых тел за счет адгезии, происходящее при трении.

Трение без смазочного материала – трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

Трение движения – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение качения – трение движения двух соприкасающихся твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по значению и направлению.

Трение качения с проскальзыванием – трение движения двух соприкасающихся тел при одновременном качении и скольжении.

Трение покоя – трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению.

Трение скольжения – трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и направлению, или по величине или направлению.

Трение со смазочным материалом – трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

Третье тело (рабочий слой) – название зоны фрикционного взаимодействия контактирующих тел, в которой расположены фрикционные связи, а также заполняющие пространство между ними смазка, загрязнения и продукты износа.

Условные механические потери – потери, определяемые методом прокрутки двигателя от постороннего источника; включают механические и насосные потери.

Фактическая площадь контакта – сумма фактических малых площадок контакта поверхности тел, являющаяся функцией геометрического очертания каждой отдельной неровности, приходящейся на нее нагрузки, механических свойств материала, из которых существенны модуль упругости, предел текучести и характеристики упрочнения материала.

Фреттинг-коррозия – разрушение поверхностей трения деталей машин с преобладанием химических реакций, проявляющееся в резко

интенсифицированном (динамическом) окислении или схватывании. Происходит при трении скольжения с очень малыми колебаниями и приложении динамической нагрузки.

Фрикционное взаимодействие – процесс непрерывного формирования пятен касания при трении под действием нормальных и тангенциальных сил.

Хемосорбция (при трении) – механизм образования соединений на поверхностях трения в результате поглощения газов, паров и растворенных веществ жидкостями или твердыми сорбентами с образованием на поверхностях раздела новой фазы или компонента.

Царапанье – процесс образования углублений на поверхности в направлении скольжения под воздействием выступов твердого тела или твердых частиц.

Шероховатость (поверхности) – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине.

Элемент пары трения – один из элементов (или материалов), участвующих в трении. Каждый элемент имеет свое название. Обычно один называется материалом трения (деталью трения), а другой – контртелом.

Эффект Ребиндера – явление адсорбционного понижения прочности поверхностного слоя материалов под воздействием ПАВ жидкой среды.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность автомобильного и других видов транспорта во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, происходящими в узлах машин. Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, теряется точность взаимного расположения деталей и перемещений. Возникают заклинивания, удары, вибрации, приводящие к поломкам. Трение приводит к потерям энергии, перегреву механизмов, снижению передаваемых усилий, повышенному расходу горючего и других материалов. Положительная роль трения заключается в обеспечении работы тормозов, сцепления, движения колес. Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения [4].

Проблемы трения, износа и смазки в машинах изучает трибология. Прикладными задачами по повышению износостойкости и управлению трением за счет применения новых конструкций узлов, материалов и эксплуатационных приемов занимается триботехника.

Одним из стимулов для развития науки о трении, изнашивании и смазке явилось бурное развитие автомобилестроения и других видов транспортного машиностроения в начале XX века. К настоящему времени трибология окончательно оформилась как самостоятельная отрасль знаний. Во всех развитых странах имеются научные трибологические центры и ведется подготовка инженеров-трибологов. Решение проблем трения, изнашивания и смазки позволило добиться высокого экономического эффекта.

Считается, что основными направлениями работ по существенному повышению эксплуатационных свойств транспортных средств на основе использования трибологии являются следующие [4]:

- совершенствование конструкции узлов трения транспортных машин, снижение материалоемкости, веса, повышение надежности и ресурса;
- применение новых материалов и технологий для повышения износостойкости и несущей способности пар трения;
- разработка и применение смазочных материалов четвертого и пятого поколений, на которые уже переходят развитые страны;
- использование экологически чистых методов эксплуатации, новых антифрикционных и фрикционных материалов с повышенными

ми параметрами, не содержащих асбест, свинец, соединения тяжелых металлов и другие токсичные и канцерогенные вещества;

- совершенствование конструкции уплотнений, обеспечивающих низкое трение, герметичность и исключающих попадание абразива в сопряжения деталей;

- ускорение перевода транспортных энергетических установок на более эффективные и экологически чистые энергоносители: топливный газ, электроэнергию, водород, солнечную энергию, применение энергоемких аккумуляторов энергии, как электрохимических, так и механических. Применение эффективных каталитических устройств газоочистки;

- повышение образовательного уровня инженеров-конструкторов, технологов и эксплуатационников в области трения, износа, смазки и других проблем трибологии.

В современной механике под трением понимают широкий круг явлений, вызываемых взаимодействием соприкасающихся поверхностей твердых тел при относительном перемещении, а также внутренним движением в твердых, жидких и газообразных средах при их деформации.

Первоначальное развитие получило изучение внешнего трения как силы сопротивления относительному движению соприкасающихся тел при трогании с места, скольжении, качении, верчении, при смазке в гидродинамическом режиме, образовании на поверхностях тонких слоев в несколько молекул (граничная смазка) либо в отсутствие смазки (сухое трение).

Внутреннее трение в твердых, жидких и газообразных средах подробно изучено в аэро- и гидродинамике и связано с необратимым рассеянием механической энергии, т.е. ее преобразованием во внутреннюю энергию.

В технике трение является инициатором деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, определяющих ресурс работоспособности узлов трения машин, их энергетику и эффективность.

1. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1. Физико-механические свойства поверхностных слоев

Свойства поверхностных слоев детали существенно отличаются от объемных свойств материала, из которого она изготовлена. Силовое поле, создаваемое атомами поверхностного слоя, обладает высокой адсорбционной способностью, вследствие чего поверхность, как правило, покрыта адсорбированными слоями воздуха, воды и различных органических веществ. Под влиянием адсорбирующихся поверхностно-активных веществ (ПАВ) происходит ослабление взаимодействия между атомами, расположенными на поверхности. Проникая в микротрещины, ПАВ создают давление, направленное в сторону дальнейшего развития трещины в глубь твердого тела и ослабляют прочность поверхностного слоя (эффект Ребиндера).

На поверхности металла, как правило, имеются окисные пленки, особенно интенсивно образующиеся при повышенных температурах. Свойства материала в поверхностном слое существенно зависят от характера обработки. При обработке материала резцом перед его передней гранью образуется зона пластической деформации, в которой происходит размельчение зерен кристаллической структуры. Этот слой с нарушенной структурой простирается на глубину в десятки микрометров, а при грубой обработке – на сотни. Аналогичные явления наблюдаются и при шлифовании. При применении высокодисперсного абразива и малой скорости обработки поверхность имеет наименьшую шероховатость при минимальной толщине деформированного слоя.

Процессы, сопровождающие трение, также в значительной мере влияют на свойства поверхностных слоев. Вследствие внедрения контактирующих выступов при тангенциальном перемещении имеет место упруго-пластическое передеформирование поверхностных слоев. Толщина деформированного слоя зависит от скорости скольжения, она уменьшается с увеличением скорости. Многократные упругие деформации приводят к возникновению усталостных явлений. Пластическая и упругая деформации поверхностного слоя в процессе трения приводят не только к изменению его свойств, но и к образованию нового микрорельефа, типичного для данных условий трения. Высокая температура, развивающаяся при трении, ведет к отжигу и

размягчению поверхностного слоя и сглаживанию микронеровностей, к структурным изменениям материала, а также к возникновению диффузионных процессов. Существенное влияние на свойства поверхности трения оказывает градиент температуры по глубине, приводящий к градиенту механических свойств. Изменение структуры поверхностного слоя существенно меняет его механические свойства. Оценивать механические свойства поверхностного слоя можно по результатам измерения его микротвердости. Обычно поверхностный слой металлов имеет большую твердость, что объясняется его наклепом. **Наклеп** – это деформационное упрочнение материала пластическим деформированием при его нагружении за пределом текучести. Упрочнение определяется взаимодействием дислокаций и изменением систем скольжения, обусловленным наличием структурных составляющих различной прочности. С ростом деформации интенсивность упрочнения снижается. Наклеп сопровождается изменением химических и физических свойств материала в результате изменения структуры и фазового состава. Различают собственно наклеп и фазовый наклеп. При собственно наклепе деформация обуславливается внешней нагрузкой, а при фазовом наклепе – фазовыми превращениями, сопутствующими объемными дефектами. При наклепе снижаются пластичность, ударная вязкость, сопротивление деформации и увеличиваются предел текучести и твердость. При поверхностном наклепе могут также увеличиваться показатели усталостной прочности. При перенаклепе в материале могут возникнуть дефекты – поры, раковины, субмикротрещины и др. – что приводит к снижению конструктивной прочности материала. При нагреве наклепанного материала происходит его разупрочнение вследствие отжига, полигонизации, рекристаллизации. Различные детали трения специально подвергают наклепу. При некоторых режимах эксплуатации наклеп может происходить самопроизвольно (например, рельсы). Наклепанный слой может быть обнаружен методами рентгеноструктурного анализа.

В результате пластической деформации после снятия нагрузки возникают остаточные напряжения, которые приводят к сдвигу электродного потенциала. Поверхностный слой в этом случае становится более активным к окружающей среде. Именно этим объясняется интенсивное образование ржавчины на деформированных пластически элементах металлических конструкций.

Таким образом, поверхностные и приповерхностные слои твердых тел отличаются по своим свойствам от слоев, расположенных в основном объеме материала. Различие свойств обусловлено различием в строении материала, которое объясняется тем, что взаимодействие элементарных образований (ионов, атомов, молекул), из которых состоят твердые тела, в поверхностных слоях и в объеме материала приводит к различным эффектам. Между каждым таким образованием действуют силы притяжения и отталкивания, обусловленные ван-дер-ваальсовскими взаимодействиями, ионными, атомными или металлическими связями, заставляющими их колебаться относительно положения равновесия. В объеме материала на каждое образование (ион, атом, молекулу) действуют силы со стороны окружающих образований. Равнодействующая этих взаимодействий в объеме равна нулю. Равнодействующая же в поверхностном слое толщиной, приблизительно равной радиусу молекулярных взаимодействий, для каждого образования вследствие асимметрии взаимодействия между частицами отлична от нуля и направлена внутрь твердого тела. Это объясняется тем, что на каждое образование, находящееся в поверхностных слоях, действие сил со стороны поверхности слабее, нежели со стороны основного материала.

Асимметрия молекулярных взаимодействий вызывает искажения строения поверхностного слоя твердого тела. Искажение строения поверхностного слоя обуславливает появление в нем избыточной потенциальной энергии, называемой *поверхностной*. Кроме того, вследствие асимметрии взаимодействий между частицами в поверхностном слое они обладают некомпенсированными молекулярными связями. Поэтому частицы, находящиеся в поверхностном слое, создают поле поверхностных сил. Если твердое тело находится в некоторой среде, то молекулы среды подходят к поверхности и адсорбируются на ней. При этом может происходить взаимодействие твердого тела с молекулами поверхностно-активных веществ (ПАВ), органическими молекулами и протекание хемосорбционных процессов. Образующиеся в результате этих взаимодействий поверхностные слои будут еще больше отличаться по своим свойствам от слоев, расположенных в объеме твердого тела.

1.2. Строение поверхностного слоя

Анализ процессов, происходящих на поверхности и в поверхностных слоях в процессе технологической обработки и эксплуатации, позволяет предложить следующую модель поверхностных слоев (см. рис. 1.1). Поверхностные слои имеют сложное строение, включают в себя слои молекул водяного пара, газов, молекул органического происхождения, хемосорбционного слоя и сильнодеформированного слоя твердого тела.

Таким образом, поверхностный слой материала детали неоднороден по строению и в нем разделяют следующие слои (рис. 1.1):

– *Верхний слой 1* – состоит из полярных молекул органического происхождения, имеющих хаотическую ориентацию;

– *Ламелярный слой 2* – состоит из полярных молекул, которые параллельны номинальной поверхности;

– *Поликристаллообразный слой 3* – состоит из органических молекул, которые обладают свойствами, отличающимися от свойств молекул в объеме;

– *Граничный слой 4* – состоит из адсорбированной пленки газов и влаги. Слой влаги располагается над пленками, появившимися на поверхности твердого тела в результате хемосорбции;

– *Приграничный слой 5* – состоит из деформированного сильно раздробленного металла с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглерожеными участками под действием высоких температур при обработке;

– *Деформированный слой 6* – состоит из зерен, сильно деформированных под действием нагрузки при обработке. В нем содержится

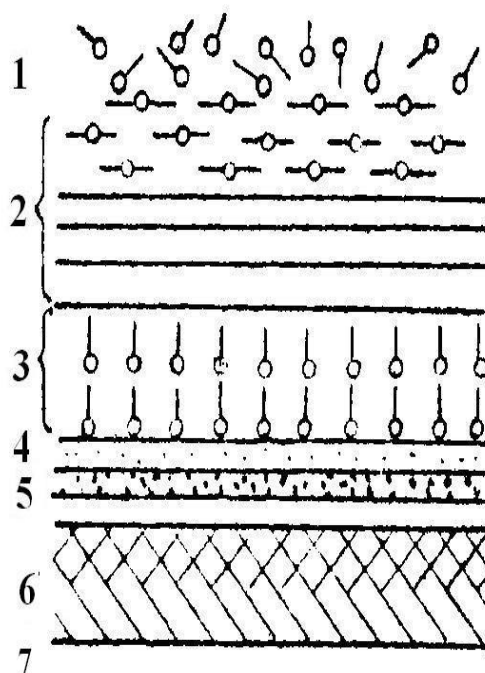


Рис. 1.1. Строение поверхностного слоя

структурно-свободный цементит, образовавшийся под действием высоких температур;

– *Металл с исходной структурой 7.*

В обычных условиях все твердые тела покрыты комбинированными пленками. Поэтому при их соприкосновении непосредственный контакт происходит не между самими твердыми телами, а между пленками, покрывающими их. Силовые взаимодействия между твердыми телами передаются через поверхностные пленки. Естественно, что механические характеристики поверхностных слоев оказывают влияние на процесс взаимодействия контактирующих твердых тел. Как показывает анализ, наиболее существенное влияние поверхностные пленки оказывают на процесс внешнего трения и менее существенное – на процесс контактной деформации.

Характерной особенностью поверхностных слоев является изменение их механических свойств, в частности, микротвердости по глубине. Общей закономерностью этого изменения является некоторое увеличение механических характеристик при возрастании расстояния от поверхности, затем прохождение через максимум и монотонное снижение до значений, характерных для основного материала. Увеличение прочности поверхностных слоев с возрастанием глубины, согласно И.В. Крагельскому [5, 6], принято называть *правилом положительного градиента механических свойств*, при соблюдении которого выполняются условия внешнего трения.

1.2. Показатели качества поверхности

В технике под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренних слоев. Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуется обобщенным понятием "качество поверхности".

Всякое реальное тело имеет отклонения от идеальной формы, называемые *погрешностями*, которые делят на 3 категории [7, 10] (рис. 1.2):

1) **макрогеометрические отклонения Δ** – это отклонения формы поверхности от заданной. Деталь с боковой поверхностью кругового цилиндра может иметь следующие погрешности:

- отклонение контура от окружности (овальность, огранка);
- отклонение от прямолинейности образующих (бочкообразность, седлообразность);
- отклонение от параллельности образующих (конусность);
- криволинейность оси;

2) **волнистость поверхности H_B** – совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышенностей и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту ($S_B / H_B > 40$). Различают продольную и поперечную волнистости;

3) **шероховатость поверхности R_{max}** – совокупность неровностей, представляющих собой выступы и впадины с относительно малым расстоянием между ними, образующих рельеф поверхности (шаг неровностей $t = 2 - 800$ мкм, $R_{max} = 0,03 - 400$ мкм).

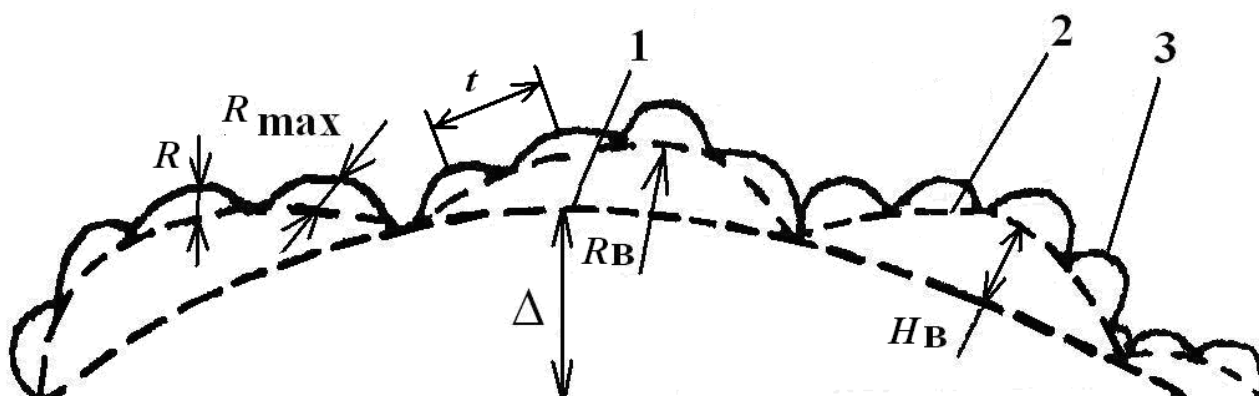


Рис. 1.2. Основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей

Графическое изображение реального профиля в определенном масштабе, полученное по данным измерений шероховатости, называют *профилограммой шероховатости* [5] (рис. 1.3). Различают продольную и поперечную профилограммы шероховатости. Профилограммы снимают с реального профиля с помощью специальных приборов – профилографов. Диапазоны увеличения современных профилографов составляют: вертикальное увеличение – 200–100000, горизонтальное увеличение – 20–2000.

Для определения параметров шероховатости применяют следующие базовые определения:

Базовая длина l – длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, и для количественного определения параметров.



Рис. 1.3. Профилограмма поверхности

Средняя линия – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии минимально.

Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

Линия впадин профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.

ГОСТ 2789-73 предусматривает следующие параметры, характеризующие шероховатость поверхности:

1) R_a – *среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии* – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|.$$

2) R_z – *высота неровностей профиля по 10 точкам* – сумма средних абсолютных значений высот 5 наибольших выступов и 5 наибольших впадин в пределах базовой длины l :

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{P_i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{V_i}| \right).$$

3) R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля – расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины l .

4) r – средний радиус кривизны вершин выступов – среднее значение кривизны выступов вершин, определенное для 5 наиболее высоких выступов в пределах базовой длины l :

$$r = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 r_i.$$

5) S_m – средний шаг неровностей – средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины l .

6) S – средний шаг в пределах одного выступа – средний шаг в пределах одного выступа, расположенных на базовой длине l .

7) Опорная кривая профиля – характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя. Опорную кривую строят в относительных координатах (рис. 1.4). Начальный участок кривой аппроксимируют степенной функцией вида

$$t_p = bx^v,$$

где $t_{p_i} = \frac{\sum \Delta l_i}{l}$ и $x_i = \frac{y_i}{R_{\max}}$, b и v – параметры опорной кривой – параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой от вершины до средней линии, построенной в относительных координатах [8].

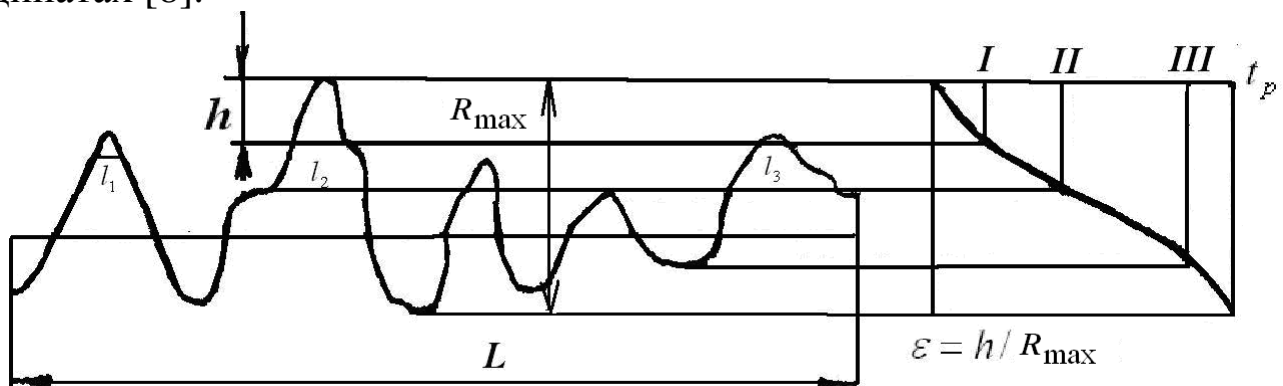


Рис. 1.4. Схема построения опорной кривой

В машиностроении параметры опорной кривой принимают значения $b = 0,4-2,5$ и $\nu = 1,8-2,2$.

8) *Комплексная характеристика шероховатости* Δ , учитывающая остроту выступов и распределение шероховатого слоя по высоте профиля, определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{R \max}{rb^{1/\nu}} .$$

2. КОНТАКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ

2.1. Три площади контакта

При контактировании деталей рассматривают три площади контакта поверхностей [8].

Номинальная площадь контакта A_a представляет собой площадь, по которой соприкасались бы тела, имея они идеально гладкую поверхность в случае плоских контактов (см. рис. 2.1). В случае тел с криволинейным очертанием поверхности это та площадь, по которой соприкасались бы два идеально гладких тела тех же очертаний под действием приложенной нагрузки, то есть эта площадь возникает в результате деформаций тел преимущественно упругих, поэтому определяется геометрией контакта, механическими свойствами материалов и приложенной нагрузкой.

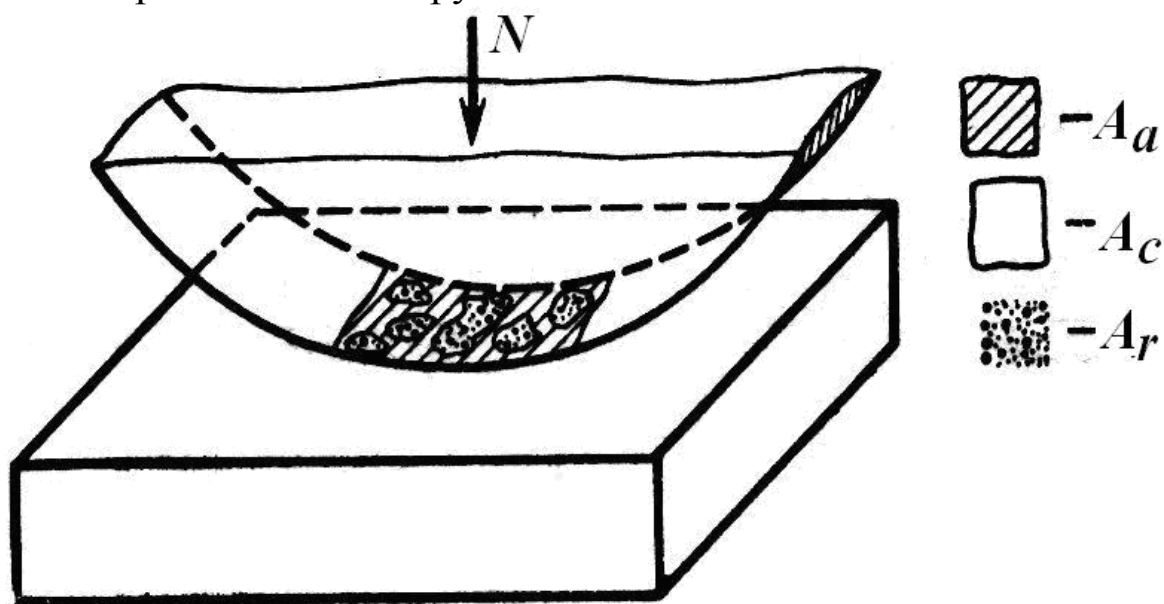


Рис. 2.1. Три площадки контакта

Вследствие волнистости поверхностей деталей фактические пятна контакта будут возникать преимущественно на вершинах волн. Каждая такая область, будучи ограничена контуром, в пределах которого существуют фактические пятна контакта, представляет собой элементарную контурную площадку ΔA_c . Эти контуры удалены один от другого на расстояние шага волны. **Контурная площадь контакта A_c** равна сумме элементарных площадок ΔA_c .

В общем случае контурную площадь контакта можно определить по следующей формуле:

$$A_c = A_a K_B K_W \left[\left(\frac{2R_B}{H_B} \right)^{1/2} \Theta P_a \right]^{\frac{\nu}{\nu+\delta}},$$

где K_B (1,8 – 2,4) – коэффициент, зависящий от распределения волн по высоте;

K_W (0,8 – 2,1), δ (0,6 – 4,5) – коэффициенты, учитывающие влияние шероховатости на деформацию волн;

A_a – номинальная площадь контакта;

H_B и R_B – высота и радиус волны соответственно;

$\Theta = \frac{1 - \mu^2}{E}$ – упругая постоянная материала;

P_a – номинальное давление в паре трения;

ν (2 – 3) – параметр степенной аппроксимации опорной кривой.

В расчетах принимают:

– при контакте волнистой поверхности с гладкой $K_W=1,8$, $\nu=2$;

– при контакте двух волнистых поверхностей $K_W=2,4$, $\nu=3$.

Следует иметь в виду, что нет необходимости очень точно определять размеры контурной площади контакта, поскольку фактическая площадь контакта, фактическое давление и другие характеристики фрикционного контакта зависят от контурного давления в степени, существенно меньшей единицы.

Контурная площадь контакта является фиктивной площадью и вводится как промежуточное звено для перехода от номинальной площади контакта A_a к фактической A_r .

Фактическая площадь контакта A_r есть сумма элементарных площадок контакта ΔA_r , возникающих в результате деформаций отдельных неровностей. Эта площадь определяет область силового взаимодействия двух шероховатых тел, обусловленного межмолекулярным взаимодействием. По этой причине расчет ФПК является одной из главных составных частей расчетов трения и износа.

Согласно введенным площадям контакта различают номинальное P_a , контурное P_c и фактическое давления P_r :

$$P_a = \frac{N}{A_a}; P_c = \frac{N}{A_c}; P_r = \frac{N}{A_r}.$$

Из анализа экспериментального материала выделяют следующие наиболее характерные особенности процесса формирования ФПК, которые сводятся к следующему:

- 1) контакт шероховатых поверхностей имеет дискретный характер;
- 2) элементарные контакты (фактические пятна контакта) возникают в результате как упругих, так и пластических деформаций;
- 3) ФПК и действующая нагрузка связаны соотношением $A_r = \text{const} \cdot N^n$, где $n = 1$ при пластическом контакте и $n = 0,8-0,9$ – при упругом;
- 4) с ростом нагрузки увеличение ФПК происходит в основном за счет возникновения новых пятен контакта, при этом средний размер контакта остается почти постоянным.

Как ФПК зависит от КПК, рассмотрим позже при рассмотрении упругого насыщенного и ненасыщенного контактов.

2.2. Взаимное контактирование деталей

Взаимное контактирование деталей происходит на вершинах волн и выступах поверхностей, образованных микронеровностями. Процесс контактирования поверхностей при статическом нагружении протекает следующим образом.

Поверхность воспринимает нагрузку вершинами выступов неровностей на высотах, образуемых макрогеометрическими отклонениями. Здесь располагаются зоны, из которых складывается фактическая площадь контакта (ФПК). В контакт первыми вступают противостоящие друг другу на сопряженных поверхностях выступы, сумма высот которых наибольшая. Деформация неровностей и их основ вызывает сближение поверхностей [9].

По мере увеличения нагрузки поверхности все более сближаются и в контакт вступают пары выступов с меньшей суммой высот. Разновременность вхождения в контакт выступов, различающихся по высоте, дифференцирует их напряженное состояние и деформацию. Возможны следующие деформации выступов [5]:

- упругая;
- упруго-пластическая без упрочнения;
- упруго-пластическая с упрочнением.

При первом нагружении чисто упругая деформация неровностей возможна только у эластичных тел (эластомеры, резина). Упругая деформация превалирует также при контактировании гладких твердых металлических поверхностей. В большинстве случаев первичного нагружения ведущая роль в формировании ФПК принадлежит пластической деформации. Входящие в касание выступы пластически сплющиваются, чаще всего с внедрением, причем внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации.

Пластические деформации выступов микронеровностей и их взаимное внедрение начинаются при среднем давлении на контакте, равном $\sim 3\sigma_T$. Предельное среднее давление на ФПК с учетом упрочнения материала в процессах пластической деформации достигает 2-3 кратного значения его твердости при вдавливании. При этом давлении материал под КПК, деформировавшийся упруго, начинает деформироваться пластически, в результате либо увеличиваются размеры площадки за счет частичного погружения находящихся в контакте выступов, либо возникают новые площадки контакта. Полное погружение выступов в пластически деформированную основу не наблюдается. После даже сильной деформации шероховатость поверхности не ухудшается, а лишь видоизменяется.

ФПК состоит из множества дискретных малых площадок, расположенных на различных высотах пятен касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. Между площадками касания тел имеются соединенные между собой или закрытые микрополости, заполненные воздухом или другой газовой средой, смазочным материалом, продуктами изнашивания и т.п.

ФПК зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-химических свойств поверхностного слоя и от нагрузки.

ФПК возрастает:

- при увеличении нагрузки;
- уменьшении шероховатости;
- росте радиуса закругления вершин.

Кроме того, ФПК несколько возрастает при продолжительности действия нагрузки, но даже при высоких нагрузках ФПК никогда не превышает 40 % НПК ($A_r = (0,0001 - 0,1) A_a$).

ФПК убывает:

- с повышением упругих характеристик;
- с увеличением предела текучести материала;
- с увеличением высоты неровностей поверхности.

При сопряжении поверхностей из двух различных материалов ФПК определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

3.1. Отличие внешнего трения от внутреннего

При скольжении твердого тела по поверхности другого возникает сила, препятствующая движению. Сопротивление относительно перемещению твердых тел, соприкасающихся под действием сжимающей нагрузки, называется *внешним трением*. Явление сопротивления относительно перемещению частей одного и того же тела называют *внутренним трением*.

Внешнее и внутреннее трение твердых тел всегда сопровождается преобразованием кинетической энергии в тепло, то есть они являются диссипативными процессами. В этом их сходство.

Принципиальное отличие внешнего трения от внутреннего заключается в следующем:

1) контакт твердых тел всегда происходит в отдельных "пятнах", площадках фактического касания, количество и размер которых зависит от нагрузки, и на которых протекает весь сложный комплекс явлений, обуславливающих природу внешнего трения. При внутреннем трении поверхность касания непрерывна и не зависит от нагрузки;

2) при внешнем трении все процессы взаимодействия соприкасающихся поверхностей протекают в тонком поверхностном слое толщиной порядка несколько миллиметров. При внутреннем трении диссипативные процессы протекают по всей толщине материала.

Необходимое условие для обеспечения внешнего трения – различие между прочностью молекулярных связей и прочностью ниже лежащих слоев, а именно выполнение правила положительного градиента сдвигового сопротивления каждого из трущихся тел по глубине, согласно которому прочность материала пары трения должна возрастать от поверхности касания вглубь материала. При соблюдении этого правила все деформации материалов в зонах фактического касания сосредотачиваются в тонком поверхностном слое. Если же молекулярная связь будет прочнее лежащих ниже слоев, то разрушение будет происходить в глубине материала, и поэтому внешнее трение будет невозможно.

3.2. Зависимость силы трения от относительного перемещения

При нормальной работе пары трения (сопряжения) происходит внешнее трение, возникающее на границе раздела в зонах фактического контакта.

Под силой внешнего трения F понимают силу сопротивления относительному перемещению контактирующих тел, направленную противоположно этому перемещению. Величина силы внешнего трения зависит в общем случае от перемещения твердых тел в тангенциальном (по касательной к поверхности трения) направлении. Характерная зависимость сил трения F от величины S относительного перемещения представлена на рис. 3.1.

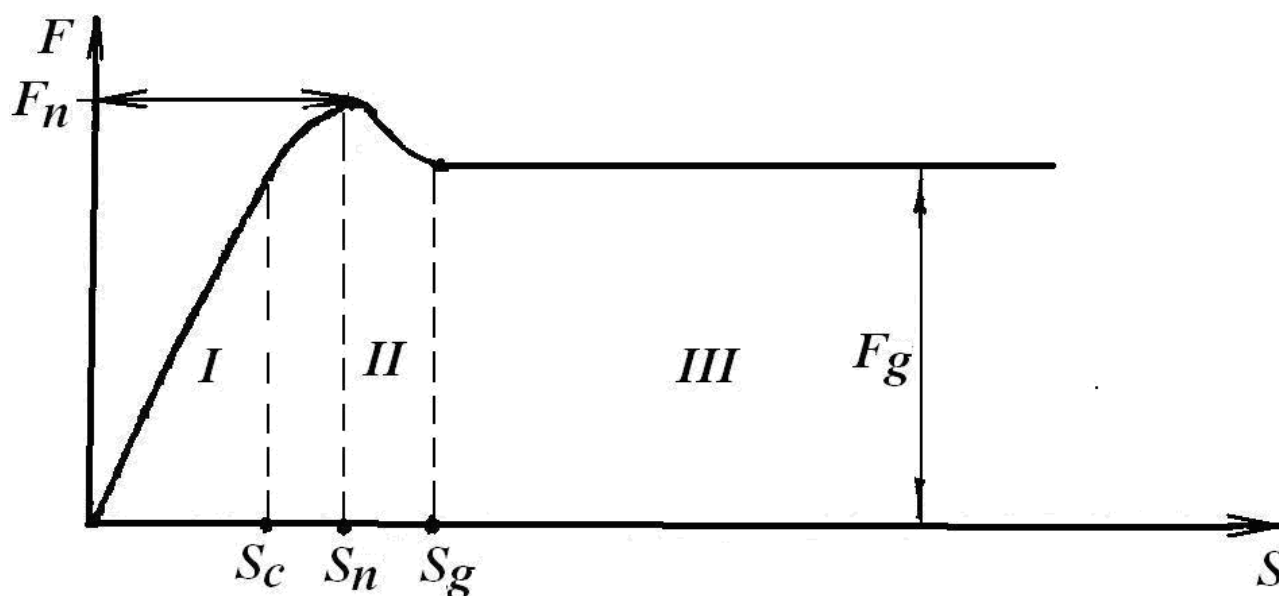


Рис. 3.1. Характерная зависимость силы трения от относительного перемещения в паре трения

Зависимость $F = f(S)$ имеет три характерные зоны:

- 1) в зоне I тангенциальные перемещения полностью обратимы и сила F прямо пропорциональна перемещению S_c ;
- 2) в зоне II тангенциальные перемещения частично обратимы и сила F имеет максимальное значение, соответствующее перемещению S_n ;
- 3) в зоне III тангенциальные перемещения необратимы и сила F не зависит от величины перемещения.

В соответствии с этими зонами различают неполную силу внешнего трения покоя, силу внешнего трения покоя и силу внешнего трения движения.

Неполная сила внешнего трения покоя – это сила сопротивления движению при обратимых и малых частично обратимых тангенциальных перемещениях, называемых предварительными смещениями. Эта сила соответствует перемещениям $S \leq S_n$. Неполная сила трения покоя реализуется в узлах трения, в которых под действием приложенных к контактирующим телам усилий не происходит их непрерывное перемещение друг относительно друга. Например, в неподвижных шлицевых и шпоночных соединениях, в крепежных резьбовых соединениях и т.п.

Сила внешнего трения покоя F_n равна значению неполной силы внешнего трения покоя, соответствующей максимальной величине предварительного смещения S_n .

Сила внешнего трения движения F_g – это сила сопротивления тангенциальному перемещению контактирующих тел, не зависящая от величины перемещения при $S \geq S_g$.

Мерой оценки трения служит коэффициент трения f , который определяется как отношение силы F сопротивления относительно перемещению двух тел при трении к нормальной составляющей внешних сил N , действующих на поверхность тела [11]: $f = F / N$.

В конструкторской практике не всегда обоснованно задаются значениями коэффициента трения, пользуясь различными справочниками, где не указаны режимы и условия, в которых эти коэффициенты получены. Приводимые в справочниках значения коэффициентов трения для различных материалов часто лишь вводят специалистов и конструкторов в заблуждение, ибо в зависимости от условий трения коэффициент трения одной и той же пары трения может изменяться в широких пределах.

В ряде случаев фрикционные характеристики получают путем снятия кривых, характеризующих зависимость коэффициента трения от внешних условий – скорости, давления, температуры. Однако получение таких кривых сравнительно трудоемко и требует специального оборудования. Поэтому предварительные значения коэффициента трения для определенных режимов работы узла трения можно получить расчетным путем.

3.3. Молекулярно-механическая природа фрикционного взаимодействия

Приложенная к контактирующим телам нормальная нагрузка вызывает сближение их поверхностей, обусловленное деформациями в отдельных зонах дискретного контакта. Обычно вследствие механических и геометрических неоднородностей происходит внедрение более жестких микронеровностей в менее жесткие. При этом в зонах контакта поверхности сближаются до расстояний, при которых проявляются взаимодействия между частицами (атомами, молекулами), из которых состоят контактирующие участки твердых тел.

При относительном скольжении твердых тел внедренные микронеровности начинают деформировать поверхностные слои контртела и движение неровности фактического контакта можно представить (рис. 3.2). Возникающее сопротивление деформированию поверхностных слоев при скольжении получило название *деформационной составляющей силы трения*. Величина этой силы зависит от глубины внедрения отдельных микронеровностей. Эта *деформационная составляющая силы трения* является **механической составляющей** силы трения [7, 10].

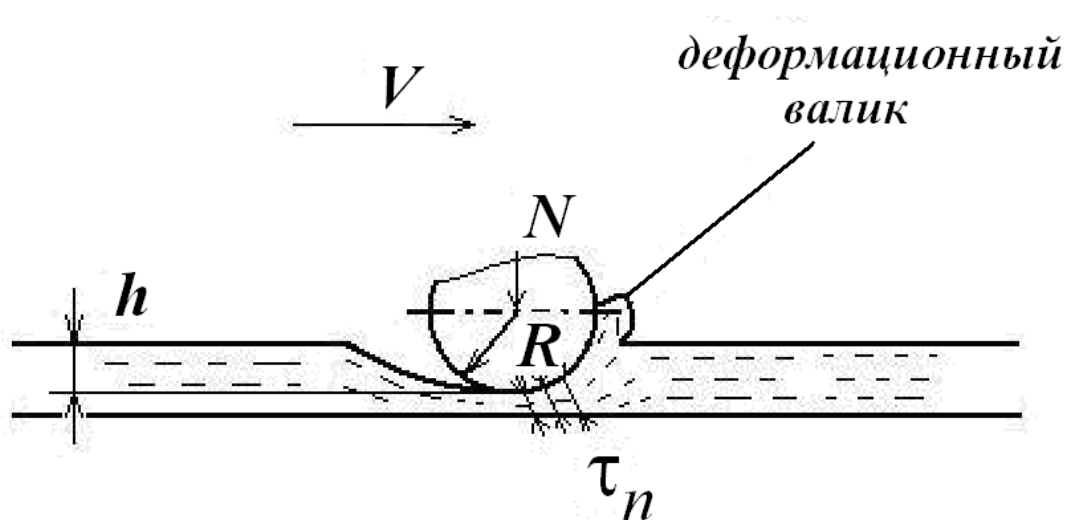


Рис. 3.2. Движение единичной жесткой неровности по упругопластическому полупространству

Однако не всякий процесс деформирования поверхностных слоев твердых тел следует рассматривать как внешнее трение. Под внешним трением понимают такой процесс деформирования поверх-

ностных слоев, когда их сплошность не нарушается, а деформациями нижележащего материала можно пренебречь. В зонах фактического касания осуществляются взаимодействия не между самими твердыми телами, а между покрывающими их пленками. Так как площадь фактического контакта достаточно мала, то в контактных зонах возникают высокие нормальные напряжения. Под влиянием больших нормальных напряжений и значительных контактных деформаций происходит частичное выдавливание пленок из зоны и разрушение хемосорбционных пленок. В общем случае в местах сближения контактных участков возможно магнитное, гравитационное и электрическое взаимодействия между атомами и молекулами веществ, находящихся в контактной зоне. Взаимодействие имеет в основном электрическую природу, так как другие взаимодействия мало энергоемки по сравнению с электрическим. Поэтому силы связи между молекулами в основном электрического происхождения. Однако межатомные связи отличаются от молекулярных. При образовании межатомных связей происходит перестройка электронных оболочек внешних электронов, обуславливающих связь. Внутренние электронные оболочки деформируются слабее. При образовании межмолекулярных связей атомы, входящие в молекулу, в основном сохраняют электронную структуру.

В зависимости от вида перестройки электронных оболочек межатомные связи подразделяются на *ковалентную, ионную и металлическую*. Наиболее общим видом взаимодействия между молекулами является ван-дер-ваальсово взаимодействие, частными случаями межмолекулярных взаимодействий является водородная связь.

Образующиеся в зонах фактического касания межатомные и межмолекулярные связи при скольжении разрушаются и образуются вновь. Это вызывает появление сопротивления скольжению. В связи с этим составляющая силы трения, обусловленная сопротивлением, возникающим в результате преодоления межатомных и межмолекулярных связей, называется *молекулярной составляющей силы трения*. Преодоление таких связей вызывает появление касательных напряжений на границе раздела взаимодействующих твердых тел.

Таким образом, сила трения обусловлена:

- 1) сопротивлениями, возникающими в результате деформирования поверхностных слоев контактирующих тел внедрившимися микронеровностями (механическая составляющая силы трения);

- 2) сопротивлениями, возникающими в результате преодоления межатомных и межмолекулярных связей (молекулярная составляющая силы трения).

Тогда сила трения на контакте будет равна:

$$F = F_a + F_m,$$

где F_a – молекулярная составляющая силы трения; F_m – механическая составляющая силы трения.

3.4. Виды взаимодействия твердых тел при контакте

При взаимодействии твердых тел при неподвижном контакте различают упругий и пластический контакты [5].

3.4.1. Упругий контакт. Упругий контакт имеет место, когда максимальные напряжения на наиболее внедренной неровности меньше твердости по Бринеллю менее жесткого элемента пары трения, соответствующее величине внедрения, определенному по формуле

$$\frac{h}{r} = 2,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2.$$

Контурное давление для наиболее широко распространенных в машиностроении шероховатостей поверхностей ($b = 2$, $\nu = 2$) можно определить по следующей формуле

$$P_c \leq \frac{1,4 HB^5 (1 - \mu^2)^4}{\Delta^2 E^4},$$

где h – глубина внедрения; r – радиус микронеровности; HB – твердость по Бринеллю.

Таким образом, для материалов, обладающих высоким модулем упругости, например для металлов, упругий контакт при первоначальном контактировании возможен только для хорошо обработанных поверхностей, для которых $\Delta \leq 0,005$ (10–11 класс шероховатости поверхности).

3.4.1.1. Упругий ненасыщенный контакт. Упругий ненасыщенный контакт – разновидность контакта двух шероховатых поверхностей, когда число контактирующих неровностей меньше числа

неровностей, расположенных на контурной площади касания. Ненасыщенный контакт возникает при трении твердых тел, жесткость которых различается мало, что соответствует контурным давлениям для наиболее широко распространенных в машиностроении шероховатостей поверхностей ($b = 2, v = 2$)

$$P_c \leq \frac{6 \cdot 10^{-3} \Delta^{0,5} E}{(1 - \mu^2)}.$$

В зоне упругого ненасыщенного контакта ФПК в зависимости от контурного давления изменяется нелинейно:

$$A_r \approx 3,14 \left[\frac{P_c (1 - \mu^2)}{\Delta^{0,5} E} \right]^{0,8}.$$

Таким образом, ФПК при упругом ненасыщенном контакте более чувствительна к изменению контурного давления, механических свойств менее жесткого материала трущейся пары и менее чувствительна к изменению шероховатости поверхности. Коэффициент трения при таком контакте

$$f = f_a + f_m = \frac{3\tau_0(1 - \mu^2)r^{0,5}}{Eh^{0,5}} + \beta + 0,17\alpha_{\text{эф}} \left(\frac{h}{r} \right)^{0,5},$$

где f_a и f_m – адгезионная и деформационная (механическая) составляющие коэффициента трения соответственно; $\alpha_{\text{эф}} = 2,5\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент гистерезисных потерь при сложном напряженном состоянии; $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент гистерезисных потерь при трении (безразмерный).

Если известно контурное давление, то коэффициент трения можно рассчитать по следующей формуле

$$f = \frac{2,1\tau_0}{P_c^{0,2} \Delta^{0,4}} \Theta^{0,8} + \beta + 0,24\alpha_{\text{эф}} P_c^{0,2} \Delta^{0,4} \Theta^{0,2},$$

где $\Theta = \frac{(1 - \mu^2)}{E}$ – упругая константа материала.

Для металлов в подавляющем большинстве случаев деформационной составляющей коэффициента трения можно пренебречь, поэтому с увеличением величины внедрения, а следовательно, и контурного давления, коэффициент трения покоя для металлических пар трения уменьшается при упругом контакте. Чем глаже поверхность,

тем выше значение контурного давления, приводящее к минимальным коэффициентам трения:

$$f_{\min} = \frac{1,5\tau_0^{0,5}\alpha_{\text{эф}}^{0,5}(1-\mu^2)^{0,5}}{E^{0,5}} + \beta,$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление; β – коэффициент упрочнения молекулярной связи (безразмерный) (параметры, получаемые из эксперимента).

Как показывают расчеты, величина комплекса, соответствующая минимальному коэффициенту внешнего трения, будет

$$\Delta = \frac{15\tau_0^{1,25}(1-\mu^2)^{0,75}}{P_c^{0,5}E^{0,75}\alpha_{\text{эф}}^{1,25}}.$$

Шероховатость поверхности, соответствующая минимальному коэффициенту внешнего трения, называется оптимальной.

При этом контурное давление должно составлять

$$P_c = \frac{2,2 \cdot 10^2}{\Delta^2} \left[\frac{\tau_0(1-\mu^2)^{0,6}}{\alpha_{\text{эф}}E^{0,6}} \right]^{2,5}.$$

Таким образом, при упругом ненасыщенном контакте минимальное значение коэффициента внешнего трения не зависит от величины приложенной нормальной нагрузки, а определяется условиями работы пары трения (τ_0 и β) и механическими характеристиками материала менее жесткого элемента пары трения.

3.4.1.2. Упругий насыщенный контакт. *Упругий насыщенный контакт* – часто встречающаяся разновидность контакта двух шероховатых поверхностей, когда число контактирующих неровностей равно числу неровностей, расположенных на контурной площади касания. Насыщенный контакт возникает при скольжении твердой шероховатой поверхности по ровной поверхности менее жесткого материала. При этом в зонах фактического контакта происходит упругое деформирование материала в результате внедрения жестких микронеровностей шероховатой поверхности твердого тела в поверхность менее жесткого материала. Имеет место при контурных давлениях, больших определяемых по формуле:

$$P_c > \frac{6 \cdot 10^{-3} \Delta^{0,5} E}{(1 - \mu^2)}.$$

Если при упругом ненасыщенном контакте площадь увеличивается в основном за счет возрастания общего числа пятен контакта вследствие вхождения новых микронеровностей в контакт, то в состоянии насыщенного контакта возрастание площади возможно только за счет увеличения единичных пятен контакта.

Коэффициент внешнего трения покоя при этом виде контакта характеризуется следующей зависимостью от нагрузки:

$$f = f_a + f_m = \frac{2,4\tau_0(1 - \mu^2)v^{0,5}}{E[v\varepsilon - (v - 1)\varepsilon_H]^{0,5}} \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^{0,5} + \beta + \frac{0,2\alpha_{\text{эф}}}{v^{0,5}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{0,5} [v\varepsilon - (v - 1)\varepsilon_H]^{0,5},$$

где $\varepsilon = h / R_{\max}$ – относительное сближение; $\varepsilon_H = h_H / R_{\max}$ – сближение, соответствующее моменту вхождения всех неровностей в контакт:

$$\varepsilon = 1,54 \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^{0,2} (P_c \Theta)^{0,4}; \quad \varepsilon_H = \frac{1}{(bv)^{v-1}}.$$

Если известно контурное давление, то коэффициент трения можно рассчитать по следующей формуле

$$f = \frac{1,4\tau_0(1 - \mu^2)^{2/3}}{P_c^{1/3} E^{2/3}} \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^{1/3} + \beta + \frac{0,35\alpha_{\text{эф}} P_c^{1/3} (1 - \mu^2)^{2/3}}{E^{1/3}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{1/3}.$$

При упругом насыщенном контакте ФПК в зависимости от нормальной нагрузки определяется следующим образом:

$$A_r = 1,5A_c \frac{r^{1/3} P_c^{2/3} (1 - \mu^2)^{2/3}}{R_{\max}^{1/3} E^{2/3}},$$

где r – радиус кривизны микронеровности.

В зоне упругого насыщенного контакта минимальный в данных условиях коэффициент трения покоя

$$f_{\min} = \frac{1,5\tau_0^{0,5}\alpha_{\text{эф}}^{0,5}(1-\mu^2)^{0,5}}{E^{0,5}} + \beta.$$

Как показывают расчеты, величина комплекса, соответствующая минимальному коэффициенту внешнего трения, будет

$$\Delta = \frac{5,7\tau_0^{1,5}(1-\mu^2)^{0,5}}{P_c E^{0,5}\alpha_{\text{эф}}^{1,5}}.$$

При этом контурное давление должно составлять для наиболее типичных видов обработки поверхностей ($b = 2, \nu = 2$)

$$P_c = 0,09 \frac{r}{R_{\max}} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,5} \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{\text{эф}}} \right)^{1,5}.$$

3.4.2. Пластический контакт. Пластический контакт имеет место, когда средние нормальные напряжения в зонах касания неровностей достигают значений твердости по Бринеллю деформируемого материала. Это будет наблюдаться при внедрениях

$$\frac{h}{r} = 5,4(1-\mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2.$$

Для наиболее широко распространенных шероховатостей поверхностей, используемых в машиностроении

$$P_c \geq \frac{14,5 HB^5 (1-\mu^2)^4}{\Delta^2 E^4}.$$

При пластических деформациях в зонах касания твердых тел может иметь место ненасыщенный и насыщенный пластические контакты.

3.4.2.1. Пластический ненасыщенный контакт. Ненасыщенный пластический контакт имеет место при контурных давлениях, определяемых по формуле

$$\frac{14,5}{\Delta^2} \left[\frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right]^4 \leq \frac{P_c}{HB} \leq 0,062.$$

При ненасыщенном пластическом контакте сила внешнего трения покоя численно равна сопротивлению, возникающему при пропахивании материала поверхности менее жесткого элемента пары трения внедрившимися неровностями, и сопротивлению, возникающему в результате межмолекулярных взаимодействий в зонах фактического контакта

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,44 \left(\frac{h}{r} \right)^{0,5}.$$

Таким образом, при пластических деформациях в зонах контакта молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения не зависит от сближения между поверхностями твердых тел. Деформационная составляющая с увеличением сближения возрастает. Поэтому общий коэффициент трения покоя с увеличением внедрения при пластических деформациях в зонах контакта увеличивается.

Если известно контурное давление, то коэффициент трения можно рассчитать по следующей формуле

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,44 \Delta^{0,5} \left(\frac{2P_c}{HB} \right)^{0,25}.$$

Минимум коэффициента трения для материалов, способных деформироваться пластически, имеет место при внедрениях

$$\frac{h}{r} = 3,9(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2.$$

При этом контурные давления для наиболее широко распространенных в машиностроении видов обработки поверхностей ($b = 2$, $v = 2$) будут

$$P_c = \frac{7,5}{\Delta^2} \frac{HB^5 (1 - \mu^2)^4}{E^4}.$$

Минимальное значение коэффициента трения в данных условиях

$$f_{\min} = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,9(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2.$$

3.4.2.2. Пластический насыщенный контакт. Пластический насыщенный контакт имеет место при контурных давлениях, превышающих значения, определяемых по формуле

$$\frac{P_c}{HB} \geq \frac{0,5}{(vb^{1/\nu})^{\nu-1}}.$$

В зоне пластического насыщенного контакта коэффициент внешнего трения покоя будет составлять

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + \frac{0,54}{\nu^{0,5}} \left(\frac{h}{r} \right)^{0,5} \left(\nu - (\nu - 1) \frac{h_H}{h} \right)^{0,5},$$

где h_H – сближение, соответствующее переходу от ненасыщенного к насыщенному контактам ($h_H = \varepsilon_H R_{\max}$), где ε_H – относительное сближение, соответствующее переходу от ненасыщенного к насыщенному контактам, которое можно определить по формуле

$$\varepsilon_H = \frac{1}{(b\nu)^{\frac{1}{\nu-1}}}.$$

Если известно контурное давление, то коэффициент трения можно рассчитать по следующей формуле

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + 0,76 \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{0,5} \left(\frac{2P_c}{HB} \right)^{0,25}.$$

Пластический насыщенный контакт может наблюдаться в тяжело нагруженных узлах трения, посадках с натягом, уплотнениях и т.д.

3.5. Правило положительного градиента сдвигового сопротивления

Между внешним и внутренним трением имеется существенное различие. Первое протекает в зоне контакта двух тел, которая зависит от приложенной нагрузки, шероховатости и механических свойств этих тел. Оно обусловлено формоизменением только поверхностного слоя и преодолением молекулярных атомарных связей, возникающих в точках реального контакта.

Второе захватывает весь объем деформируемого тела и обусловлено формоизменением всего объема.

Для правильного понимания внешнего трения важно учесть, что основным отличием внешнего трения от внутреннего является локализация процессов, порождающих сдвигающую силу в тонком поверхностном слое. В связи с этим для обеспечения внешнего трения необходимо наличие на поверхности твердого тела ослабленного слоя, локализирующего деформации сдвига. Отсюда вытекает универсальная значимость установленного правила градиента, согласно которому образовавшаяся фрикционная связь должна быть тем более прочна, чем глубже лежащие слои.

Внешнее трение осуществляется и в том случае, если выполняется правило градиента хотя бы для одного тела, имеющего меньшее сдвиговое сопротивление по сравнению с другим телом. Разделение поверхностей трения слоем жидкой или консистентной смазки – один из искусственных приемов создания положительного градиента.

Смазочное действие базируется на использовании физических процессов адсорбции полярных молекул смазки с металлом (образования молекулярного ворса). При повышении температуры адсорбционные эффекты нарушаются. Современные машины работают в более жестких температурных режимах, поэтому используют химические и трибохимические эффекты взаимодействия масел и присадок, которые, вступая во взаимодействие с поверхностью металла, образуют химические соединения, имеющие малое сдвиговое сопротивление.

За последнее время получили развитие методы нанесения покрытий, обладающих малым сдвиговым сопротивлением (полимерные пленки, а для высоких температур – пленки из мягких металлов), для высоконагруженных узлов трения применяют новые методы создания градиента, например, путем размягчения тончайшей пленки самого материала, предохраняющей нижележащие слои от разрушения.

Для оценки процесса трения существенно применение двух безразмерных характеристик:

h / r – отношение глубины внедрения неровности к ее радиусу;

τ / σ_T – отношение сдвигового сопротивления на этой неровности к пределу текучести наклепанного материала основы.

Для обеспечения внешнего трения сумма этих отношений должна быть

$$\frac{h}{r} + \frac{\tau}{c\sigma_T} \leq \frac{1}{2},$$

где c – безразмерный коэффициент, зависящий от формы выступов и от упрочнения материала. Чем меньше эта сумма, тем лучшие условия создаются для узла трения.

Следствием приведенной зависимости является то, что для каждой пары материалов существует своя зона внешних параметров (нагрузок, скоростей, температур), в которой возможно их использование.

Существуют следующие методы осуществления положительного градиента сдвигового сопротивления:

- 1) формирование пленок при трении из окружающей среды:
 - а) адсорбция;
 - б) химические соединения;
 - в) образование полимерной пленки из смазки;
- 2) нанесение покрытий и смазок:
 - а) предварительное нанесение металлических или полимерных пленок;
 - б) в процессе трения перенос мягкого компонента из сплава;
- 3) разрыхление поверхностного слоя:
 - а) избирательное растворение;
 - б) механико-химическая деструкция;
- 4) повышение твердости подложки:
 - а) механическое упрочнение;
 - б) термическое, термохимическое и термомеханическое упрочнение.

Перспективным является осуществление эффекта избирательного растворения, когда понижение сдвигового сопротивления поверхностного слоя осуществляется атермическим путем.

Частичная диссоциация кристаллической решетки на поверхности твердого тела является важным фактором, формирующим третье тело, который позволяет по-иному рассматривать граничное трение, вкладывая в этот термин иной смысл. Это трение не на границе двух тел, а трение, характеризуемое свойствами третьего тела, образующегося в зоне контакта.

Третье тело – рабочий слой или зона фрикционного взаимодействия контактирующих тел, в которой расположены фрикционные связи, а также заполняющие пространство между ними смазка (загрязнения) и продукты износа. Таким образом, зона фрикционного взаимодействия рассматривается как некое физическое тело, имеющее малую толщину и обладающее особыми свойствами, отличными от свойств исходных тел [9].

Схематический разрез контакта двух твердых тел показан на рис. 3.3.

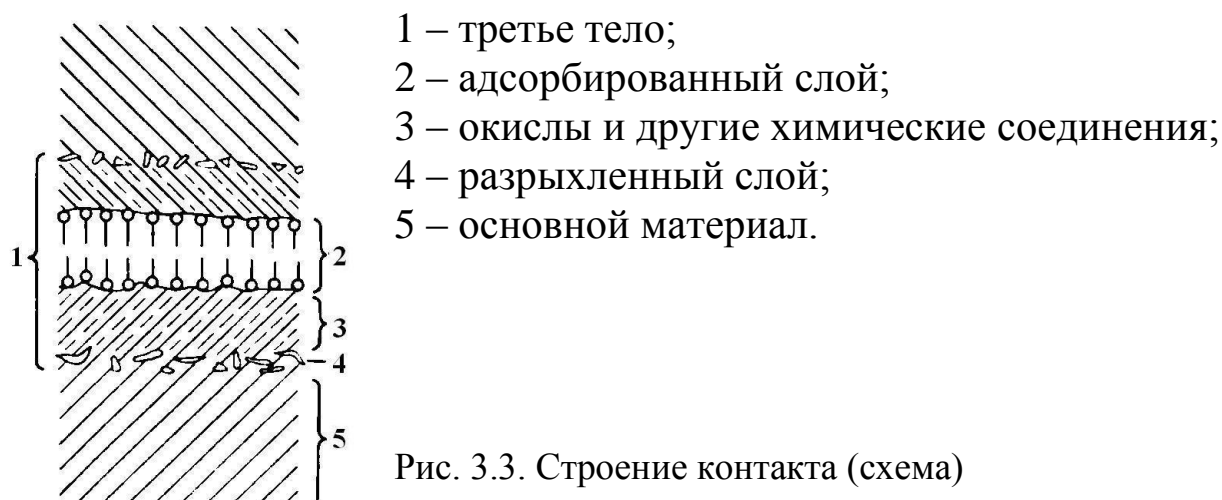


Рис. 3.3. Строение контакта (схема)

Третье тело состоит из нескольких слоев. Верхний слой представляет собой граничную пленку смазки, адсорбированную или хемосорбированную пленку. Толщина этой пленки может изменяться от мономолекулярного слоя – порядка нескольких десятков ангстрем до 1000 А; наличие той или иной пленки зависит от температуры на контакте. При росте температуры адсорбированная пленка разрушается, а хемосорбированная формируется.

Под этой пленкой обычно располагается пленка окисла металла или другого химического соединения – сульфида, хлорида, фосфида, и, наконец, под этой пленкой лежит тонкий слой разрыхленного материала основы.

Сдвиговое сопротивление третьего тела изменяется в широких пределах и зависит от свойств образующих его частей. Пленка не одинакова по толщине – есть участки, не покрытые пленкой.

Сдвиговое сопротивление третьего тела должно быть всегда меньше сдвигового сопротивления основы, поэтому важнейшей характеристикой его является отношение $\frac{\tau_{тр}}{\tau_{основы}}$.

При скольжении единичные фрикционные связи, составляющие третье тело, непрерывно сменяют одна другую – одни нарушаются, а другие образуются вновь. При больших скоростях этот процесс сопровождается значительными температурными вспышками, достигающими иногда температуры плавления более легкоплавкого материала. Следует заметить, что одна и та же микрообласть поверхности может многократно участвовать в образовании фрикционных связей. В конце концов поверхностный слой разрушается, образуя частицы износа, которые обычно несколько превышают размер пятна контакта.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ ПРИ ДВИЖЕНИИ

4.1. Виды и режимы трения

Различают следующие виды трения:

1) *сухое* – без смазочного материала.

2) *со смазочным материалом*; при этом виде трения возможны следующие режимы трения:

а) граничная смазка;

б) полужидкостная смазка;

в) жидкостная смазка:

– гидростатическая;

– гидродинамическая.

Таким образом, в зависимости от количества и свойств смазки между трущимися поверхностями различают трение сухое, граничное, полужидкостное и жидкостное.

4.1.1. Сухое трение. Сухое трение имеет место в тормозах, фрикционных передачах, в узлах, работающих при высоких температурах и в вакууме. При сухом трении смазочный материал между трущимися поверхностями практически отсутствует. При этом наблюдается механическое зацепление микронеровностей и молекулярное взаимодействие поверхностей в зонах контакта. В этом случае сила трения выражается законом Амонтона – Кулона:

$$F = f \cdot N,$$

где N – нормальная сила; f – коэффициент трения скольжения.

Коэффициент f зависит от величины микро- и макронеровностей поверхностей, скорости относительного их скольжения, физических свойств трущихся материалов и температуры. Величина коэффициента трения f "чистых" металлов для металлических пар лежит в пределах от 0,06 до 0,20.

В настоящее время режим сухого трения достаточно адекватно описывает гипотеза молекулярно-механического трения: $f = f_a + f_m$, где f_a – молекулярная составляющая коэффициента трения, f_m – механическая составляющая коэффициента трения.

На ФПК поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превы-

шающих межатомные расстояния в кристаллических решетках и которые растут с увеличением температуры.

Сухое трение сопровождается скачкообразным скольжением поверхности (вибрации при включении сцепления, "визг" тормозов и т.д.). Во избежание "скачков" при сухом трении применяют следующие меры:

- 1) увеличивают жесткость системы;
- 2) повышают скорость скольжения;
- 3) подбирают материал для пар трения такой, чтобы коэффициент трения незначительно возрос на этапе предварительного смещения.

4.1.2. Трение при граничной смазке. При граничной смазке поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2–10 раз и снижает износ сопряженных поверхностей в сотни раз. При граничном трении молекулы масла адсорбируются кристаллической решеткой металла, образуя один или несколько слоев упорядоченных молекул. Это позволяет несколько снизить пластические деформации металлов и уменьшить таким образом крайне негативные последствия сухого трения.

Механизм трения при граничной смазке представляется в следующем виде. Под нагрузкой происходят упругая и пластическая деформации на площадках контакта наиболее близкого прилегания поверхностей, покрытых граничной пленкой смазочного материала вплоть до мономолекулярного слоя. На площадках может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки.

Сопротивление движению при скольжении складывается из:

- 1) сопротивления сдвигу граничного слоя;
- 2) сопротивления "пропахивания" поверхностей внедрившимися объемами.

Кроме того, на площадках контакта, подвергнутых наибольшей пластической деформации может произойти разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии обнажившихся поверхностей и схватывания металлов на этих участках.

При граничной смазке внешняя нагрузка полностью воспринимается поверхностью контакта.

4.1.3. Трение при полужидкостной смазке. Полужидкостная смазка имеет место при наличии одновременно жидкостной и граничной смазки.

В случае трения при полужидкостной смазке нормальная нагрузка уравнивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей на площадках их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Относительная доля каждой реакции зависит от:

- 1) нагрузки;
- 2) скорости взаимного перемещения поверхностей;
- 3) шероховатости поверхности;
- 4) жесткости и макрогеометрии поверхностей;
- 5) количества и вязкости смазочного материала.

Гидродинамическое действие жидкости может возникнуть в двух случаях:

1) если макрогеометрия соприкасающихся поверхностей такова, что существует сужающийся зазор, в который масло может попасть при трении, то при подаче масла в достаточном количестве и при подходящих параметрах режима трения возникает поток и образуется подъемная сила;

2) если неровности между площадками контакта образуют в направлении относительного перемещения деталей места сужения и расширения по высоте. При достаточном количестве масла между поверхностями трения микрополости сужения играют роль гидродинамических микроклиньев. Гидродинамическое действие масла на микроклиньях проявляется уже при самой малой скорости скольжения.

4.1.4. Трение при жидкостной смазке. При жидкостном трении контакта трущихся поверхностей вообще не должно быть, равно как и их изнашивания. Согласно гидростатической теории смазки, пусть даже без непосредственного контакта незначительный износ поверхностей все же наблюдается в результате физико-химических, в том числе и электростатических процессов, возникающих между трущимися поверхностями, и контакта их со смазочным материалом.

При жидкостной смазке поверхности трения разделены слоем жидкости под давлением, которое полностью уравнивает внешнюю нагрузку. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением масла (вязкостью). Сила жидкостного трения не зависит от природы сопряженных поверхностей. При жидкостном трении контакт поверхностей заменяется трением слоев смазки. Коэффициент трения выражается соотношением:

$$f = A \cdot \mu \cdot V / N,$$

где A – коэффициент пропорциональности; μ – коэффициент динамической вязкости; V – скорость относительного перемещения; N – нормальная сила.

Все режимы трения можно увязать между собой с помощью диаграммы Герси–Штрибека (рис. 4.1). На этой диаграмме минимум коэффициента трения и начало кривой износа I приходится на переход между жидкостным и полужидкостным режимами трения.



Рис. 4.1. Диаграмма Герси–Штрибека – зависимость коэффициента трения от характеристики $\lambda = \eta V / N$

4.2. Основные закономерности процессов контактного взаимодействия скользящих поверхностей

Сложность явлений, протекающих на фрикционном контакте, заключается в их многообразии.

Например, механическое деформирование материала осуществляется по двум схемам: первой – внедрением с пропахиванием, второй – свариванием (образованием адгезионных мостиков) с последующим отрывом.

Разрушение носит *кумулятивный* характер. Ему предшествует многократное воздействие на деформируемый слой, оцениваемое миллионами циклов. Влияние этого воздействия зависит от окружающей среды и возникающего температурного поля.

Так как воздействие является в основном фрикционным, то оно существенно зависит от характера возникающих на поверхностях пленок, которые определяются природой и составом среды (например, если среда газ – зависит от содержания в нем влаги).

Однако, несмотря на сложное переплетение разнообразных механических, физических и химических процессов, выявляются некоторые положения, общие для процесса трения и изнашивания [5].

1. Трехслойный характер процесса трения. На фрикционном контакте одновременно протекают три взаимосвязанных процесса:

- взаимодействие поверхностей;
- изменение под влиянием сил трения поверхностных слоев твердых тел и присутствующих на поверхностях пленок;
- разрушение поверхностного слоя.

Вследствие этого коэффициент трения и износостойкость определяются не только свойствами исходного вещества и характером окружающей среды, но и режимом, влияющим на изменение свойств трущихся тел.

Режим в основном зависит от контактной температуры, развиваемой при трении, и соответственно возникающего температурного градиента. Влияние давления и скорости существенно не только само по себе, но и потому, что от них зависит развивающаяся температура.

2. Дискретность контакта твердых тел. Шероховатость и волнистость твердых тел приводят к осуществлению контакта в отдельных пятнах (диаметром от 0,1 до 20–30 мкм), сосредоточенных в областях, расположенных на вершинах волн.

3. Практическое постоянство фактического давления при увеличении нагрузки. Рост площади контакта с увеличением нагрузки при соприкосновении шероховатых поверхностей или шероховатого тела с гладким в основном идет за счет увеличения числа пятен контакта при незначительном увеличении их диаметров.

Вследствие этого фактическое давление на одном пятне контакта слабо растет при увеличении номинального давления.

4. Суммирование тангенциальных сопротивлений. Вследствие дискретной природы контакта двух твердых тел (в условиях сухого и граничного трения), обусловленного шероховатостью и волнистостью, для расчета тангенциального сопротивления в первом приближении можно применять принцип суммирования сопротивлений, возникающих на единичных фрикционных связях, то есть

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n T_i .$$

Диссипация энергии при образовании и разрушении единичной фрикционной связи обусловлена в основном двумя видами сопротивления:

- преодолением молекулярного взаимодействия в точках реального контакта, характеристикой которого является τ / σ_T ;
- преодолением механического сопротивления пропахиванию, оцениваемого h / r ;

5. Градиент сдвигового сопротивления. Для осуществления внешнего трения необходима локализация всех процессов взаимодействия и разрушения в тонком поверхностном слое, поэтому сдвиговое сопротивление тонкого поверхностного слоя должно быть меньше сдвигового сопротивления основы.

6. Формирование третьего тела при трении. Необходимость соблюдения правила градиента сдвигового сопротивления требует для осуществления внешнего трения формирования ослабленного поверхностного слоя основного материала или формирования на поверхности трения пленок, имеющих меньшее сдвиговое сопротивление, чем основа.

7. Стационарное состояние пары трения. На фрикционном контакте при неизменных внешних параметрах (нагрузке, скорости, окружающей среды) протекают самопроизвольно процессы приработки, приводящие, как правило, к минимальному значению трения, износа, температуры и формированию воспроизводимой шероховатости. Это находится в соответствии с принципом минимального производства энтропии, который формулируется неравновесной термодинамикой.

8. Критические точки. В процессе трения и износа существуют критические точки, соответствующие при изменении внешних параметров переходу от одного вида контактного взаимодействия к другому.

9. Оптимальная концентрация активной фазы. При монотонном увеличении концентрации активного вещества, взаимодействующего с твердым телом, величина интенсивности износа и коэффициента трения переходит через минимум. Это объясняется закономерностью изменения толщины пленки, образующейся на поверхности.

5. ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Изнашивание материалов – процесс разрушения поверхностных слоев трущихся тел, который приводит к уменьшению размеров тел (износу) в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Интенсивность изнашивания пар трения зависит от свойств материалов деталей, технологической подготовки поверхностей и их качества, а также от условий эксплуатации – нагрузки, температуры, смазки и пр.

Многообразие возникающих в контактном слое изменений приводит к различным видам износа. Вид износа нельзя определить одним термином, так как механизм разрушения поверхностного слоя различный.

По характеру промежуточной среды различают:

- 1) износ при трении без смазки;
- 2) износ при граничном трении;
- 3) износ при наличии абразива.

По характеру деформирования поверхностного слоя различают:

- 1) износ при упругом контакте;
- 2) износ при пластическом контакте;
- 3) износ при микрорезании.

5.1. Механизм изнашивания

Разрушение поверхностей трения обычно проявляется в отделении частиц материала, размер которых изменяется в пределах от долей микрон до нескольких микрон. Отделение этих частиц большей частью подготавливается многократным воздействием нагрузок, температурных импульсов на единичные неровности. В результате постоянного накопления необратимых изменений возникает неоднородность структуры, напряженного состояния, то есть образуются концентраторы, далее возникают трещины, которые, смыкаясь, образуют частицы износа. Во многих случаях разрушению предшествует изменение свойств твердых тел. Естественно, что в этих условиях подготовка к разрушению материала и характер разрушения весьма многообразны.

5.1.1. Единичная фрикционная связь. Наличие неровностей на поверхностях реальных твердых тел приводит к тому, что при контактировании их касание происходит в отдельных зонах, называемых "пятнами" касания. Процессы, обуславливающие природу трения и изнашивания, протекают в элементарных площадях физического касания.

Фрикционной связью называют единичное пятно касания, образовавшееся при одновременном действии нормальных и тангенциальных нагрузок и исчезающее при снятии нормальной нагрузки.

Характер нарушения фрикционной связи и комплекс процессов, протекающих в поверхностных слоях и микрообъемах, существенно зависят от ряда факторов: геометрических, механических, физических и химических.

В зависимости от прочности на сдвиг молекулярных связей (τ_n) по отношению к пределу текучести (σ_T) основы материалов соприкасающихся тел и величины взаимного относительного внедрения неровностей сжатых поверхностей возможны различные напряженные состояния на контакте и виды нарушения фрикционных связей.

Фрикционную связь можно характеризовать двумя безразмерными параметрами: τ_n / σ_T и h / r , где τ_n – сдвиговая прочность межатомных и молекулярных связей, σ_T – предел текучести материала, h – глубина внедрения микронеровности, r – радиус кривизны микронеровности.

Одним из наиболее мощных факторов является геометрический, характеризуемый отношением глубины внедрения или величины сжатия к радиусу единичной неровности (h / r). Эта характеристика позволяет различать упругий контакт, пластический контакт и микрорезание.

Вторым существенным фактором является физико-механический, характеризуемый отношением тангенциальной прочности молекулярной связи к пределу текучести материала основы (τ / σ_T). При этом следует различать два случая:

1) нарушение связи по поверхности раздела двух тел или по пленкам, покрывающим эти тела, когда не затрагиваются слои основного материала;

2) нарушение связи не по поверхности раздела двух тел, то есть в глубине основного материала. В этом случае внешнее трение переходит во внутреннее.

5.1.2. Виды фрикционных связей. И.В. Крагельским в 1962 г. была предложена классификация фрикционных связей [5], основанная на характере взаимодействия и разрушения поверхностей путем нарушения фрикционных связей. В зависимости от величины и соотношения между этими параметрами различают 5 основных видов фрикционных связей:

1) **Упругое оттеснение материала выступами контртела** имеет место, когда действующая нагрузка и адгезия не приводят к возникновению в зоне контакта напряжений, превышающих предел текучести, то есть этот вид связи характеризуется отсутствием остаточных деформаций. Разрушение материала (износ) в этом случае возможно лишь в результате фрикционной усталости после многократного повторного нагружения.

Адгезия (прилипание) – возникновение молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных тел, являющейся результатом межмолекулярного взаимодействия, ионной или металлической связи. Частный случай – **когезия** – взаимодействие соприкасающихся однородных тел. Предельный случай адгезии – **хемосорбция** – химическое взаимодействие на поверхности раздела с образованием слоя химического соединения.

2) **Пластическое оттеснение материала**, характеризуемое появлением остаточной (пластической) деформацией, которое происходит, если контактные напряжения достигают предела текучести и материал обтекает внедрившиеся выступы контртела. Износ в данном случае будет результатом малоциклового фрикционной усталости. Причем число циклов нагружения, приводящее к разрушению основы, сравнительно мало (малоцикловая усталость). Средние нормальные напряжения на контакте постоянны ($P_r \approx \sigma_T$) во многих случаях, особенно при трении покоя и равны твердости по Бринеллю (HB).

3) **Микрорезание** происходит, если контактные напряжения или деформации достигают разрушающих значений, когда нарушается режим обтекания выступов деформируемым материалом. Разрушение в этом случае происходит при первых же актах взаимодействия. Микрорезание характеризуется разрушением материала основы и отделением частиц износа при однократном нагружении. К этому виду нарушения фрикционной связи можно отнести абразивное изнашивание, когда разрушающее действие частицы абразива аналогично действию глубоко внедренной неровности.

4) *Адгезионное нарушение фрикционной связи* по той же поверхности, по которой она возникла, не приводит непосредственно к разрушениям, но вносит вклад в величину действующих на контакте напряжений и деформаций, то есть сопутствует усталостным процессам. В этом случае происходит "прилипание" пленок, покрывающих поверхности, трение и разрушение фрикционной связи происходит на глубине в пределах толщины пленок.

5) *Когезионный отрыв* возникает, если прочность фрикционной связи выше прочности лежащего ниже материала и происходит глубинное вырывание. Износ при этом, как и в случае 3, происходит после первых же взаимодействий. Когезионное разрушение поверхности при большой прочности адгезионных связей сопровождается схватыванием поверхностей и глубинным вырыванием материала. Такой вид нарушения фрикционной связи мешает нормальной работе сопряжения и приводит к задиру поверхностей трения.

Таким образом, изнашивание поверхностей деталей возникает под действием трения и зависит от материалов деталей, качества обработки их поверхностей, нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей, их температур и, пожалуй, самое важное – качества и количества смазочного материала.

5.2. Основные виды изнашивания

Для определения условий изнашивания деталей, работающих в узлах трения, с целью обоснованного применения отделочно-упрочняющей обработки для повышения износостойкости поверхностей требуется использование классификации узлов трения, учитывающей влияние параметров качества поверхностного слоя, образующегося в процессе изготовления деталей.

Рассмотрим основные виды изнашивания, встречающиеся в области энергомашиностроения.

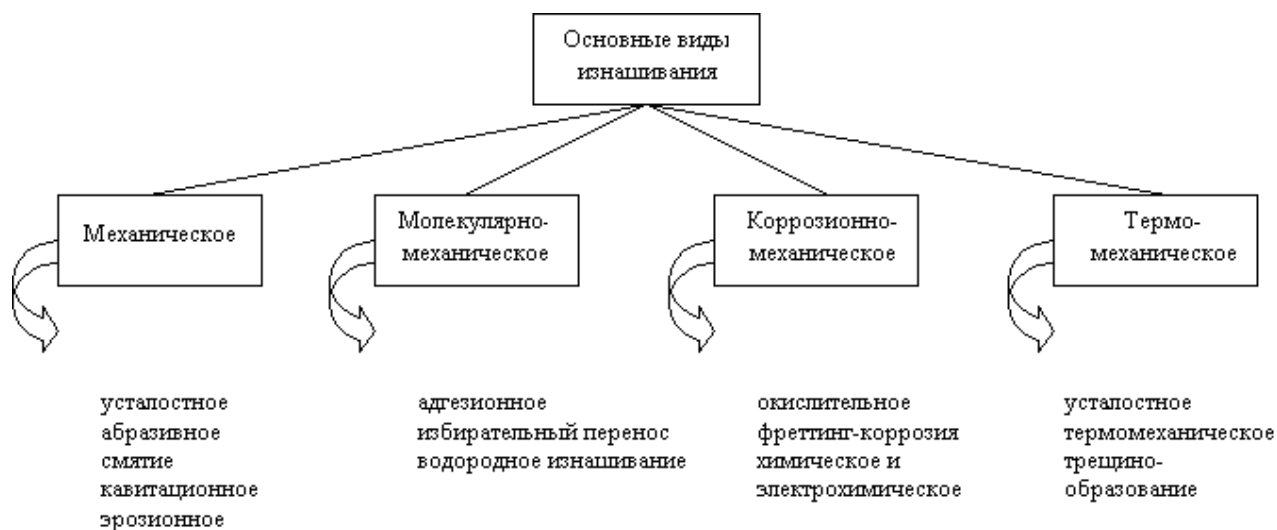


Рис. 5.1. Классификация видов изнашивания

5.2.1. Механическое изнашивание

5.2.1.1. Абразивное изнашивание. Абразивным материалом именуют минерал естественного или искусственного происхождения, зерна которого имеют достаточную твердость и обладают способностью резания (скобления, царапания).

Абразивным изнашиванием называют разрушение поверхности детали в результате ее взаимодействия с твердыми частицами при наличии относительной скорости. В роли таких частиц выступают:

- неподвижно закрепленные твердые зерна, входящие в контакт по касательной либо под небольшим углом атаки к поверхности детали (например, шаржирование посторонними твердыми частицами мягких антифрикционных материалов);
- незакрепленные частицы, входящие в контакт с поверхностью детали (например, насыпные грузы при их транспортировании соответствующими устройствами, абразивные частицы в почве при работе почвообрабатывающих машин и т. д.);
- свободные частицы, пребывающие в зазоре сопряженных деталей;
- свободные абразивные частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных, транспортных машин и транспортирующих устройств, узлы металлургического оборудования, металлорежущих станков, шасси самолетов, рабочие колеса и

направляющие аппараты гидравлических турбин, лопатки газовых турбин, трубы водяных экономайзеров и паровых котлов, лопасти дымососов, трубы и насосы земснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промышленности, подшипники валов гребных колес, подшипники гребных валов судов при плавании на мелководье и т. п.

На процесс абразивного изнашивания может влиять:

- природа абразивных частиц;
- агрессивность среды;
- свойства изнашиваемых поверхностей;
- ударное взаимодействие;
- нагрев и другие факторы.

Изнашивание твердыми зёрнами – при контакте абразивные частицы (зёрна), оставаясь целыми или разрушаясь, упруго деформируют металл. При этом зёрна могут вдавливаться в металл, поворачиваться или даже выходить из контакта, оставив полосу.

Изнашивание при ударе абразивных частиц – этот процесс называют ударно-абразивным изнашиванием. На него влияет природа и геометрическая форма, твердость, хрупкость абразивных частиц, толщина слоя абразива, энергия удара, твердость испытываемого материала, наличие жидкости в зоне удара и т.д. После ударно-абразивного износа на поверхности остаются лунки.

Изнашивание в зонах пары трения. Попавшие в зазоры пар трения абразивные частицы участвуют в восприятии приложенной нагрузки и могут в зависимости от условий впрессовываться в поверхности трения, раздавливаясь на более мелкие фракции, скользить или перекатываться вдоль поверхности изнашивания, упруго и пластически деформируя ее.

Изнашивание в потоке газа или жидкости. Здесь контакт с деталью может протекать под разными углами атаки жидкости или газа. Износ зависит от массы частиц, скорости их падения, свойств абразива, физико-механических свойств металла. При этом на поверхности детали может возникнуть либо упругая деформация, либо пластическая деформация, хрупкое разрушение, перенаклеп с отделением металла в виде чешуек.

5.2.1.2. Изнашивание вследствие пластической деформации.

Этот вид изнашивания (смятия) заключается в изменении размеров

или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов.

Смятие является характерным видом шпоночных пазов и шпонок, шлицевых соединений, штифтов и упоров, резьбовых соединений и др.

Смятие характерно для деталей, входящих в контакт с ударом.

В тихоходных зубчатых передачах с колесами невысокой твердости возникают значительные пластические деформации с образованием канавок у ведущих зубьев.

Пластической деформации также подвергаются рельсы, колеса подвижного состава железных дорог.

Вмятины и углубления могут появиться на подшипниках качения за счет попадания сторонних частиц.

На подшипниках скольжения появляются повреждения из-за выдавливания баббитового слоя из зоны контакта.

5.2.1.3. Кавитационное изнашивание.

Гидродинамическое изнашивание

Кавитация дословно означает "полость, каверна". Однако под кавитацией понимают явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости пустот в виде пузырей, полос и мешков, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. Это явление обусловлено следующим. В движущемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препятствий на его пути давление может упасть до уровня, соответствующего парообразованию при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям, может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воздух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кавитации. Образовавшиеся парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности потока.

Исследования показали, что кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001

с. В определенных типах кавитации на площади в 1 см^2 в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 млн кавитационных пузырьков.

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромониторах и в потоках, обтекающих лопасти центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным поломкам.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования.

Кавитационная стойкость материала определяется его составом и структурой. Повышение содержания углерода в углеродистой стали увеличивает ее стойкость. Однако, начиная с 0,8 % С, она начинает падать. Пластинчатый перлит более стоек, чем зернистый. Введение никеля и хрома в сталь повышает ее стойкость за счет снижения количества феррита, увеличения степени дисперсности и др. Шаровидная форма графита благоприятна. Наиболее стойким является низколегированный чугун (1 % Ni, 0,3 % Mo) с шаровидным графитом. Закалка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ), цементация, поверхностное упрочнение увеличивают стойкость.

Вибрационная кавитация

Возникает при колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела. Давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может упасть и вызвать образование кавитационных пузырей. Условия кавитации зависят от внешнего давления на систему и насыщенности жидкости воздухом.

Вибрационную кавитацию могут вызвать звуковые колебания, особенно ультразвуковые. Звуковые волны ускоряют окислительно-восстановительные реакции, вызывают внутримолекулярные перегруппировки веществ, усиливают диспергирование, ускоряют процессы мойки и обезжиривания поверхностей и вызывают коагуляцию мелких частиц.

Вибрационная кавитация проявляется в двигателях внутреннего сгорания, особенно на наружных поверхностях гильз в результате их

колебаний от ударов поршня. Износ от кавитации наружной стенки гильзы может быть в 3–4 раза больше, чем износ внутренней поверхности от действия поршневых колец.

5.2.1.4. Эрозионное изнашивание. Эрозия в широком понятии – процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие: разрушение поверхности материалов вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность.

В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен. Жидкость, внедряясь при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится эрозионно-абразивным.

5.2.2. Молекулярно-механическое изнашивание

5.2.2.1. Схватывание и заедание поверхностей при трении.

Схватывание – явление прочного соединения металлов в результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- разноименных металлов.

На образовании прочных металлических связей между двумя заготовками основаны такие технологические процессы, как кузнечно-прессовая сварка, контактная сварка сопротивлением, плакирование методом горячей прокатки. Но в отличие от сваривания, эти процессы характеризуются соединением металлов при значительном давлении и при температуре выше температуры рекристаллизации.

На явлении схватывания базируются технологические процессы холодной сварки металлов.

Сущность схватывания: если приложить нагрузку к двум соприкасающимся металлическим поверхностям, то в результате контакта (на расстояниях порядка межатомных) произойдет схватывание поверхностей с выделением энергии.

Если у одного и того же металла контактирует два кристаллита с одинаковой ориентацией, т.е. с параллельным расположением кристаллографических плоскостей, то произойдет их простое сращивание в один общий кристаллит.

Если же контактируют два кристаллита с различной ориентацией, то между ними образуется переходная зона. Для образования переходной зоны используется поверхностная энергия, высвобождающаяся в результате перестройки структуры. При этом образуются узлы сваривания.

Процесс возникновения и разрушения узлов сваривания видоизменяется в зависимости от контактирующих деталей, их материалов и режимов трения. При контакте двух тел могут происходить вырывы материала макро-, микро- и субмикроскопических частиц и перенос их с одной поверхности на другую. При дальнейшем контакте приваренные частицы срываются, вырываются и уносятся из зоны трения. При этом интенсивность изнашивания будет различной. При эксплуатации машин для качественной оценки степени повреждений поверхностей используются следующие термины.

Натир – участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление. Натир бывает светлого (результат сглаживания микронеровностей поверхности или образования мельчайших рисок в направлении скольжения) и темного цвета (результат местных повышенных температур и образования окисных пленок). Натир может образовываться при любом виде изнашивания.

Задир – наиболее яркая форма проявления схватывания. Образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей.

5.2.2.2. Избирательный перенос при трении. В середине 50-х гг. прошлого столетия при исследовании технического состояния узлов трения самолета "ИЛ" на разных этапах его эксплуатации было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки

меди на поверхностях деталей тяжело нагруженных узлов при работах пары трения сталь – бронза при смазывании спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1...2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала износ пары трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз.

Исследования показали, что медная пленка образуется в результате анодного растворения бронзы: легирующие элементы уходят в смазочный материал, а поверхность обогащается медью. После того как поверхности бронзы и стали покроются медью, растворение прекращается, устанавливается режим избирательного переноса.

Образовавшуюся защитную пленку называют "сервовитной". Она представляет собой вещество (металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению.

Свойства медной пленки, "рожденной" в процессе трения, иные, чем у обычной меди, получаемой восстановлением медных руд.

Исследованиями установлено, что пленка толщиной 1...2 мкм имеет рыхлую, пористую структуру. Параметр решетки пленки меньше, чем параметр решетки бронзы. Под сервовитной пленкой на границе со сталью имеется слой окислов меди, легирующих элементов или примесей толщиной около 0,1 мкм. В самом верхнем слое пленки нет скоплений дислокаций, т.е. нет повреждений, приводящих к разрушению поверхности. Установлено, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она не способна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Пленка в верхней части не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую, т.е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения. Трение бронзы о сталь в условиях избирательного переноса можно уподобить скольжению тела по льду, при котором жидкий коэффициент трения вместо воды обеспечивает пленка расплавленного металла.

Избирательный перенос проявляется при трении стали по стали, стали по чугуна, чугуна по чугуна, стали по спеченному материалу, металлополимеру, стеклу, бронзе, алюминиевым сплавам.

5.2.2.3. Водородное изнашивание. Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Он выделяется из материалов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание обусловлено следующими процессами, происходящими в зоне трения:

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна;
- адсорбцией водорода на поверхностях трения;
- диффузией водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения;
- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и эффектом накопления водорода.

Сущность водородного изнашивания в том, что при трении двух тел максимальная температура образуется не на поверхности тел, а на некоторой глубине. Это создает условия, при которых водород под действием температуры диффундирует вглубь поверхности, там концентрируется и вызывает охрупчивание поверхностных слоев, а следовательно, усиливает изнашивание.

Область проявления водородного изнашивания весьма обширна. Практически все трущиеся поверхности стальных и чугунных деталей содержат повышенное количество водорода и, следовательно, подвержены повышенному изнашиванию. Наличие в воздухе паров воды создает благоприятные условия для водородного изнашивания. Водородное изнашивание может быть вызвано не только водородом, который образуется при трении, но и водородом, который может образоваться при различных технологических процессах. При выплавке чугуна в доменном процессе из влаги дутья образуется водород, который и попадает в металл. При термической обработке, например в результате азотирования (при диссоциации аммиака), выделяющийся водород диффундирует в сталь и т.д.

Наличие водорода в окружающей среде приводит к водородному охрупчиванию, которое влияет на прочность. Различают несколько видов охрупчивания, которые делятся на две группы:

- охрупчивание первого рода, обусловленное источниками, которые имеются в исходном металле вследствие повышенного содержания водорода;

- охрупчивание второго рода, обусловленное источниками, которые развиваются в металле с повышенным содержанием водорода в процессе пластической деформации.

Охрупчивание первого рода является обратным и усиливается с повышением скорости деформации.

Охрупчивание второго рода развивается при малых скоростях деформации и может быть как обратимым, так и необратимым.

Теории водородного охрупчивания можно разделить на четыре группы.

1. Теория давления молекулярного водорода, согласно которой охрупчивание есть результат давления молекулярного водорода в макро- и микропустотах, а также в трещинах внутри металла. Давление возникает в результате молизации атомарного водорода.

2. Адсорбционные гипотезы, объясняющие снижение разрушающего напряжения уменьшением поверхностной энергии внутри трещин при адсорбции водорода (водород действует как поверхностно-активное вещество).

3. Теория взаимодействия водорода с решеткой металла; водород является разновидностью дефекта, понижающего прочность когезионной металлической связи.

4. Теории, основанные на взаимодействии водорода с дислокациями; водород производит блокирующее действие на дислокации.

Для защиты металлов от воздействия водорода рекомендуются методы:

- введение в сталь сильных карбидообразующих элементов (хром, молибден, ванадий, ниобий и титан) для стабилизации карбидной составляющей и предупреждения обезуглероживания стали;

- футеровка стали металлами, имеющими более низкую водородопроницаемость (например медь, алюминий и др.);

- уменьшить содержание в сталях соединений серы, сурьмы, селена и др., которые способствуют проникновению в металл водорода.

Водородное изнашивание отличается от водородного охрупчивания. Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородным охрупчиванием стали ни по интенсивности и характеру распре-

деления водорода в стали, ни по характеру разрушения. Водородное изнашивание связано только с процессом трения и обусловлено трением: трение создает условия для диффундирования водорода из смазочного материала на некоторую глубину от поверхности трения, где располагается максимум температуры при трении. Там образуются множественные трещины, которые сливаясь разрушают металл.

Для снижения интенсивности водородного изнашивания рекомендуется придерживаться следующих методов уменьшения и предупреждения водородного изнашивания.

1. При выборе материалов для узлов трения необходимо учитывать степень их наводороживания и охрупчивания. Введение в сталь меди, хрома, ванадия, титана снижает проникновение в нее водорода.

Холоднодеформированная сталь может поглотить в 1000 раз больше водорода, чем отожженная.

Водородная хрупкость проявляется в основном в сталях ферритного класса. В закаленных и слабоотпущенных сталях хрупкое разрушение возможно даже при ничтожно малом количестве водорода.

Необходимо, где возможно, исключать из узлов трения полимеры, способные к быстрому разложению и выделению водорода.

2. В смазывающие жидкости полезно вводить ингибиторы проникновения водорода (кремний и органические соединения, содержащие несколько атомов хлора). Механизм их действия: при электролизе ионы водорода разряжаются на внешней поверхности ионов – в результате нарушается непосредственный контакт ионов водорода с поверхностью катода.

3. Водородное изнашивание можно снизить удалением из зоны контакта веществ, способствующих проникновению водорода: селен, сурьму и др.

5.2.3. Коррозионно-механическое изнашивание

5.2.3.1. Окислительное изнашивание. Это изнашивание происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются; продукты износа состоят из окислов. Здесь нет агрессивной среды, процесс изнашивания протекает при нормальных и повышенных температурах при трении без смазочного материала.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями пленки был достаточен для образования пленки относительно большой толщины.

Окислительному изнашиванию подвержены калибры, детали шарнирно-болтовых соединений тяг и подвесных устройств машин, работающих без смазочного материала; колеса фрикционных передач и т.д.

Повышение температуры способствует росту окислительных пленок, а вибрация – разрушению.

5.2.3.2. Коррозия. Коррозией называют разрушение поверхности металла в результате химического или электрохимического воздействия среды. Чистая металлическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды. Однако если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от коррозионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней. Процесс искусственного образования тонких окисных пленок на поверхности металла для защиты его от коррозии и придания изделию лучшего вида называют пассивированием.

Химическая коррозия протекает при взаимодействии металлов с сухими газами, парами и жидкими неэлектролитами.

Газовой коррозии подвержены цилиндры двигателей внутреннего сгорания, выпускные клапаны, элементы паровых котлов и т.д. На углеродистой стали газовая коррозия проявляется в виде пленки окислов уже при температуре 200–300 °С, с повышением температуры примерно до 600 °С в связи с образованием под действием внутренних напряжений трещин в защитной пленке скорость коррозии возрастает и образуется окалина.

Электрохимическая коррозия обусловлена неоднородностью металла в контакте с электролитом. Эта неоднородность проявляется в различных формах:

1. Неоднородность сплавов связана с тем, что они состоят из двух и более структурных составляющих;

2. Неоднородное физическое состояние металла обусловлено различием между зерном и его границей, неоднородностью структуры (ликвация, газовые пузыри и неметаллические включения);

3. Различное напряженное состояние смежных участков детали под нагрузкой изменяет физическое состояние даже одного металла;

4. Различие в концентрации раствора электролита, смачивающего металл, и неодинаковые условия подвода кислорода к различным участкам поверхности – это иная категория неоднородности состояния. Существование на поверхности металла микроучастков с различными электрическими потенциалами является причиной образования огромного количества гальванических микроэлементов, в результате работы которых происходит коррозия.

На скорость коррозии влияет температура (с повышением ее коррозия усиливается) и скорость омывания средой металлической поверхности; при значительной скорости среды коррозия усиливается под действием эрозии.

В некоторых машинах можно встретиться с щелевой коррозией, при которой коррозионные повреждения сосредоточены в зазоре между поверхностями. Зазором могут быть щели между листами, зазоры в сопряжениях и стыках, зоны трещин в металле, а также щели между осевшими или прилипшими к поверхности посторонними веществами.

Щелевой коррозии подвержены даже металлы, которые устойчивы к другим видам коррозии благодаря образованию на их поверхностях пленок, обладающих высокими защитными свойствами. Вибрации и эпизодические относительные микросмещения поверхностей повреждают образующуюся защитную пленку в щели, благоприятствуют ее удалению и, создавая условия для большей неравномерности концентрации среды, способствуют более интенсивной коррозии в щели.

Коррозия рабочих поверхностей деталей у неработающих машин снижает износостойкость пар трения по следующим причинам: у неработающих пар ухудшается качество поверхности и после пуска

машины снова начинается приработка; продукты коррозии действуют как абразив; срабатывание продуктов коррозии, происходящее за малое время, сопряжено с быстрым изменением линейных размеров детали в неблагоприятную сторону.

5.2.3.3. *Изнашивание при фреттинг-коррозии.* Фреттинг-коррозия – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл – металл или металл – неметалл в результате малых колебательных относительных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь-сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь-олово или алюминий, сурьма, а также чугун-бакелит или хром и многие другие пары трения.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

Продукты фреттинг-коррозии стальных изделий в атмосфере воздуха имеют цвет от светло-красно-коричневого до темно-коричневого в зависимости от марок материалов, давления, влажности и частоты циклов микросмещений.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде кислорода, азота и гелия. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в атмосфере воздуха выше, чем в вакууме и в среде азота, а в кислороде больше, чем в гелии.

Язвины и продукты коррозии на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения, на осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, на запрессованных в картерах вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на центрирующих поверхностях шлицевых соединений, на опорах силоизмерительных устройств, на опорных поверхностях пружин, на затянутых стыках, в

заклепочных соединениях между листами, на заклепках и в отверстиях, на болтах и т. п. – результат проявления фреттинг-коррозии.

Необходимые для протекания этого процесса относительные микросмещения сопряженных поверхностей совершаются вследствие деформации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, происходящих в упругих системах.

Универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет, но для ее уменьшения необходимо:

- уменьшить микросмещения;
- снизить силы трения;
- сосредоточить скольжение в промежуточной среде.

Уменьшить относительное микросмещение можно путем придания деталям соответствующих конфигураций или посредством повышения силы трения. Силы трения можно увеличить, повысив давление путем уменьшения площади соприкосновения деталей или повысив коэффициент трения за счет увеличения шероховатости поверхности. Шероховатость будет длительно влиять на коэффициент трения, если один из элементов пары не является металлом. Другой метод увеличения силы трения состоит в нанесении на поверхность электролитического слоя меди, олова, кадмия, серебра или золота.

Если исключить вибрацию невозможно, то необходимо либо уменьшить силу трения, или перенести скольжение в промежуточную среду: добавить свинцового белика, парафин; поверхности покрыть фосфатным, свинцовыми или индиевыми покрытиями.

Уменьшить повреждение от фреттинг-коррозии можно, повышая твердость одной детали; при этом уменьшается взаимное внедрение деталей, что снижает интенсивность изнашивания.

5.2.4. Термо-механическое изнашивание

5.2.4.1. Усталостное изнашивание. Возникает в деталях, подвергающихся длительному нагружению переменными по направлению и величине усилиями. Усталостные трещины берут начало на поверхности трения и входят, сужаясь, в глубь слоя. Развиваясь по длине, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. Раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного масла. На более поздней фазе трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между слоем и

основанием, в результате отдельные участки поверхностного слоя обособляются от остального слоя, а затем выкрашиваются. Большую роль в отделении частиц, вероятно, играет смазочный материал, который, проникнув в трещину, как бы подрывает металл над ней. Иногда трещина не доходит до стыка и продвигается вблизи него и параллельно ему. Выкрашивание крупных кусков слоя может сопровождаться поверхностными язвинами.

Усталостное разрушение можно разделить на четыре стадии:

1. Инкубационная. В отдельных зернах развиваются после некоторого числа циклов нагружения полосы скольжения, и в локальных объемах накапливаются искажения кристаллической решетки, что приводит к повышению микротвердости и предела жесткости при снижении модуля упругости. На некотором этапе этой стадии микротвердость начнет снижаться, оставаясь все же выше исходной.

2. Разрыхление. В некоторых зернах, расположенных в наиболее напряженных объемах, в результате сдвигов появляются широкие полосы скольжения, в которых зарождаются поры и субмикроскопление трещин, развивающихся до микроскопических размеров.

3. Распространение полос скольжения за пределы зерен и рост микротрещин вследствие концентрации напряжений из их концов до критического размера (макротрещин).

4. Окончательное разрушение в результате самопроизвольного распространения макротрещин в образцах малого размера или из хрупких материалов.

Если усталостное разрушение происходит по границам зерен, то оно может завершиться еще до развития широких полос скольжения.

Субмикроскольжение трещины как дефект структуры существует в исходном материале или образуется уже при малых статических или циклических нагрузках. Под действием переменных нагрузок, превышающих некоторый предельный диапазон, в наиболее напряженной зоне поверхностного слоя образуются трещины, дальнейшее изменение которых определяется общими условиями контакта.

Усталостное изнашивание зависит от режима работы и конструкции деталей, физических свойств материала и покрытия и др.

5.2.4.2. Трещинообразование термического происхождения.

Растрескивание поверхностей трения в результате термического воздействия наблюдается на поверхностях железнодорожных колес и

тормозных колодок. При торможении происходит интенсивный нагрев колес и колодок, а затем их остывание. При этом на поверхности колес и колодок образуются трещины и подплавление металла. Образование трещины повышает износ поверхностей трения. При этом плоская кольцевая поверхность колес переформируется в волнообразную и на поверхности появляются темные полосы, чередующиеся со светлыми. Темные полосы на выступах – следы перегрева, светлые полосы – впадины.

Трещины на рабочих поверхностях признаются неизбежными и на некоторых стадиях развития не снижают надежности торможения, поэтому существуют допуски на трещины.

Тормозные колодки бракуют, когда трещины достигают глубины более 5 мм.

Мерой борьбы с терморастрескиванием является выбор материала. Чем выше теплопроводность материала, тем меньше температурное расширение, чем пластичнее металл, тем меньше вероятность образования в нем трещин.

Склонны к терморастрескиванию хрупкие и обладающие малой теплопроводностью материалы – стекло, керамика, твердые сплавы, закаленные стали, а также сплавы с большим содержанием никеля или с висмутом, которые обладают низкой теплопроводностью.

Высокая точность обработки поверхностей трения и тщательная их приработка – дополнительное средство борьбы с растрескиванием.

Трещинообразование от перенаклепа встречается в условиях трения качения, когда твердость поверхности не настолько низка, чтобы произошла заметная пластическая деформация, и не настолько высока, чтобы предупредить микропластическую деформацию в пределах всей рабочей поверхности.

5.2.5. Наиболее характерные виды повреждений при различных режимах трения. Для жидкостного режима характерны следующие виды повреждений поверхностей:

- 1) усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушение);
- 2) износ за счет абразивного воздействия частиц, попадающих с маслом;
- 3) кавитационные повреждения (местные и общие по всей или по большей части поверхности).

Для **смешанного или граничного режимов** характерны следующие виды повреждений поверхностей:

- 1) усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушение);
- 2) износ за счет абразивного воздействия частиц и схватывания на отдельных участках пар трения;
- 3) образование глубоких и широких борозд, приводящих к задир пар трения.

При **трении без смазки** возникают следующие виды повреждений поверхностей:

- 1) износ за счет схватывания, сопровождаемый вырывами и переносом материала с одной поверхности на другую;
- 2) задир пар трения, приводящий к образованию глубоких и широких борозд;
- 3) износ за счет смятия (пластической деформации) пар трения.

5.3. Физическая модель износа

Трудоемкость ремонта деталей машин значительно (в 5 раз и более) выше, чем изготовление новой детали, вследствие малой механизации процесса ремонта и возникает необходимость повышения износостойкости деталей машин. Для прогнозирования износостойкости деталей, особенно на этапе проектирования машин, важное место занимают расчеты на износ.

Исследования показывают, что важную роль в изнашивании материала играют не только твердость материала и нагрузки на пару трения, но упругие свойства материала, режим работы детали (скорость, температура), внешние условия (смазка, окружающая среда) и конструктивные особенности фрикционного узла (диаметр, длина подшипника и т.д.).

Износ характеризуется линейной интенсивностью изнашивания (безразмерная величина)

$$I = \frac{U}{L},$$

где L – путь трения, мм; U – величина износа в миллиметрах на пути трения L .

Интенсивность может изменяться в широких пределах от 10^{-3} до 10^{-13} . На основе накопленного опыта различают следующие классы интенсивности изнашивания, приведенные в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Классы интенсивности изнашивания

Класс	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
$\lg I_{\min}$	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
$\lg I_{\max}$	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3

Установленные классы интенсивности изнашивания объединяются принятыми в механике твердых тел основными видами контактного взаимодействия поверхностей трения:

I–V классы – упругим деформированием;

VI–VII классы – упругопластическим деформированием;

VIII–IX классы – микрорезанием.

Основное уравнение для расчета интенсивности изнашивания в случае множественного контакта

$$I = K_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{r} \frac{P_a}{P_r} \frac{1}{n}},$$

где K_1 – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях

твердых тел (обычно $K_1 \approx 0,2$); $\alpha = \frac{A_a}{A_r}$ – коэффициент перекрытия; n

– число циклов нагружения, приводящее к отделению объема материала от поверхностного слоя.

Но этой формулой неудобно пользоваться, так как в данном случае интенсивность изнашивания зависит от числа циклов нагружения. Поэтому при инженерном расчете на износ используют следующую формулу для упругого контакта

$$I = K_1 \alpha 2^{1/2\nu} P_a P_c^{1/2\nu} P_r^{t_y - 1 - \frac{1}{2\nu}} \Delta^{0,5} \left(\frac{k f_m}{\sigma_0} \right)^{t_y},$$

где t_y – параметр кривой фрикционной усталости (зависит от материала контактирующих деталей и вида смазки, определяется экспериментально и принимает значения 2–10); k – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте и зависит от природы материала – для хрупких материалов $k=5$, для высокоэластичных $k=3$); f_m – механическая составляющая коэффициента трения; σ_0 – разрушающее напряжение при однократном растяжении.

Контурное давление (без учета влияния шероховатости на деформацию волн)

$$P_c = 0,2E^{0,8} \left(\frac{H_B}{R_B} \right)^{0,4} P_a^{0,2}.$$

Фактическое давление на контакте

$$P_r = 0,5E^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} P_c^{\frac{1}{2\nu+1}}.$$

Целесообразно различать следующие разновидности контакта:

1. **Контактирование шероховатых неприработанных поверхностей без волнистости ($P_c=P_a$):** сопряжения малогабаритных деталей, то есть когда линейные размеры, ограничивающие номинальную площадь контакта, соизмеримы с базовой длиной по ГОСТ 2789-73 – опоры часовых механизмов, резьбовые, штифтовые, шпоночные соединения; сопряжения, в которых одна из деталей имеет малую жесткость – направляющие планки, лезвийный инструмент и др.; сопряжения, образующие высшую кинематическую пару – зубчатые передачи, кулачки, колесо – рельс и пр.

$$I = K_2 \alpha K_{t\nu} P_a^{1+\frac{t_y}{2\nu+1}} E^{\frac{2\nu t_y}{2\nu+1}-1} \Delta^{\frac{\nu t_y}{2\nu+1}} \left(\frac{k f_m}{\sigma_0} \right)^{t_y},$$

где $K_{t\nu}$ – поправочный коэффициент числа циклов до отделения частицы износа (зависит от t_y и ν , определяется экспериментально и может принимать значения от 1 до 400).

$$K_2 = 0,5^{t_y-1-\frac{1}{2\nu}} 2^{1/2\nu} K_1.$$

2. **Контактирование шероховатых и волнистых неприработанных поверхностей ($P_a \neq P_c$):** дисковые тормоза, сцепления и др.

$$I = K_3 \alpha K_{t\nu} P_a^{1 + \frac{t_y}{5(2\nu+1)}} E^{\frac{2t_y(5\nu+2)}{5(2\nu+1)} - 1} \Delta^{\frac{t_y}{2\nu+1}} \left(\frac{H_B}{R_B} \right)^{\frac{2t_y}{5(2\nu+1)}} \left(\frac{kf_m}{\sigma_0} \right)^{t_y},$$

где

$$K_3 = 0,2^{2\nu+1} 2^{1/2\nu} K_2.$$

3. Приработанные поверхности – детали любой конфигурации, у которых на поверхностях трения установилась оптимальная шероховатость, воспроизводящаяся в процессе изнашивания. Это наиболее распространенный вид контактирования. В этом случае давление на контакте

$$P_r \approx 0,7 \left(\frac{\tau_0 E}{\alpha_r} \right)^{0,5}.$$

Тогда коэффициент трения будет

$$f \approx 1,4 \left(\frac{\tau_0 \alpha_r}{E} \right)^{0,5} + \beta.$$

Следовательно, коэффициент трения приработанных поверхностей не зависит от прикладываемой нагрузки и микрогеометрии поверхностей трения.

Шероховатость, устанавливающаяся после завершения процесса приработки поверхностей, можно оценить формулой

$$\Delta \approx \frac{15 \tau_0^{1,25}}{E^{0,75} P_r^{0,5} \alpha_r^{1,25}}.$$

Тогда интенсивность изнашивания приработанных поверхностей будет равна

$$I = 15^{0,4t_y} K_2 \alpha K_{t\nu} E^{\frac{t_y}{2} - 1} \frac{\tau_0^{0,5}}{\alpha_r^{t_y/2}} \left(\frac{kf_m}{\sigma_0} \right)^{t_y}.$$

В тех случаях, когда различие между упругими свойствами истирающего и истираемого тел достаточно велико, следует воспользоваться приведенным модулем упругости

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}.$$

Если различие поверхностей составляет более двух классов, то шероховатостью более гладкой поверхности можно пренебречь.

5.4. Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания

Рассмотренные расчетные зависимости позволяют проследить влияние различных факторов на износ. Для многих видов обработки, в том числе приработанных поверхностей $\nu \approx 2$, параметр фрикционной усталости для большинства материалов изменяется в пределах $t_y = 2-10$. Исходя из указанных значений, приведем пределы изменения показателей степени (табл. 5.2), зависящие от ν и t_y , при параметрах, учитывающих влияние отдельных факторов на интенсивность изнашивания [5].

Таблица 5.2

Поверхность контакта	Показатель степени при величине						
	P_a	E	Δ	$\frac{H_B}{R_B}$	f_m	τ_0	α_T
Шероховатая без волнистости не приработанная	1,4–3	0,6–7	0,8–4	–	2–10	–	–
Шероховатая и волнистая не приработанная	1,08–1,4	1,9–9,6	0,8–4	0,16–0,8	2–10	–	–
Приработанная	1	0–4	–	–	2–10	0,5	1–5

Удельная нагрузка (номинальное давление). Для неприработанных поверхностей удельная нагрузка нелинейно влияет на износ, причем более существенно на поверхности с малой площадью контакта, то есть без волнистости. Волнистость поверхностей значительно уменьшает нелинейный характер этой зависимости. Для прирабо-

танных поверхностей интенсивность изнашивания прямо пропорциональна удельной нагрузке.

Упругие свойства материала (модуль упругости). Модуль упругости значительно влияет на износ материала, причем для материалов с одинаковой прочностью на разрыв увеличение его ведет к увеличению износа. Большой интервал изменения показателя степени соответствует контакту шероховатой поверхности без волнистости, а большее абсолютное значение этого показателя имеет место для шероховатой и волнистой поверхности. Однозначную зависимость между модулем упругости и интенсивностью изнашивания экспериментально установить затруднительно, потому что имеется связь между модулем упругости и фрикционными свойствами, в частности, с коэффициентом трения, а также прочностными характеристиками (σ_0 и t_y).

Свойство несовершенной упругости учитывают коэффициентом гистерезисных потерь α_2 , знание которого важно для прогнозирования износа приработанных поверхностей.

Прочностные свойства материала (σ_0 и t_y). Увеличение абсолютных значений этих характеристик всегда положительно влияет на износостойкость. Чем больше σ_0 , тем прочнее материал при однократном разрыве, и чем больше t_y , тем большее количество циклов требуется для отделения частиц износа.

Фрикционные свойства сопряжения (коэффициент трения f). Интенсивность изнашивания сильно зависит от коэффициента трения $I \sim f^{t_y}$ и от прочностных свойств σ_0 . Эта связь неоднозначна, так как коэффициент трения зависит также от упругих свойств материала, шероховатости поверхностей, удельной нагрузки и параметров, характеризующих молекулярное взаимодействие на контакте.

Шероховатость и волнистость поверхностей. Влияние микрогеометрии поверхности на износ весьма существенно. Поскольку комплексный критерий шероховатости Δ может изменяться на 4 порядка в пределах $10^{-3} - 1$, а показатель степени при Δ лежит в пределах 0,8–4, то пренебрежение шероховатостью может привести к ошибке в несколько порядков при определении интенсивности изнашивания.

Волнистость поверхностей может менять интенсивность изнашивания в меньших пределах, потому что $10^{-3} > \frac{H_B}{R_B} > 10^{-6}$, а показате-

тель степени меньше 1, что в крайних случаях дает изменение на 1 или 2 порядка. Поэтому учет волнистости необходим, хотя точность определения абсолютного значения параметра волнистости, необходимого для расчета, сравнительно невысока. В случае износа приработанных поверхностей исходная микрогеометрия трущихся поверхностей не влияет на интенсивность изнашивания.

Молекулярное взаимодействие на контакте в условиях трения (смазки, совершенства очистки поверхностей, окружающей газовой среды и параметров, характеризующих ее состояние) учитывается параметрами τ_0 и β . Чем меньше сдвиговое сопротивление и коэффициент упрочнения молекулярной связи, тем меньше интенсивность изнашивания поверхностей трения. Именно поэтому введение смазочного материала повышает износостойкость узлов трения.

Температурно-скоростной фактор. Влияние скорости скольжения на фрикционные свойства изучено еще недостаточно. Скорость скольжения определяет время существования единичной фрикционной связи и, следовательно, скорость деформирования материалов. Поэтому на трение и износ материалов оказывает влияние вязкость фрикционного контакта. От скорости скольжения зависит мощность тепловыделений и температура на контакте. Нагрев поверхностных слоев трущихся тел приводит к изменению в них механических и фрикционных свойств и механо-химическим структурным изменениям. Поэтому следует рассматривать температурную зависимость износа как следствие температурных зависимостей тех свойств материала, которые вошли в расчетные уравнения, то есть t_y , σ_0 , f , E .

Модуль упругости материалов E сравнительно мало уменьшается с ростом температуры. Более существенно уменьшение параметра прочности σ_0 . Коэффициент же трения в зависимости от температуры может уменьшаться, возрастать или оставаться неизменным. Это объясняется различным характером изменения соотношения между молекулярной и механической составляющими коэффициента трения. Вопрос об изменении параметра t_y в зависимости от температуры еще не изучен, поэтому его экспериментальное определение следует вести при температурном режиме, близком к тому, который будет иметь место в реальном узле трения.

5.5. Диаграмма изнашивания деталей машин

В процессе изнашивания поверхностей деталей любой техники, в частности двигателя, выделяют три периода, согласно рис. 5.1.

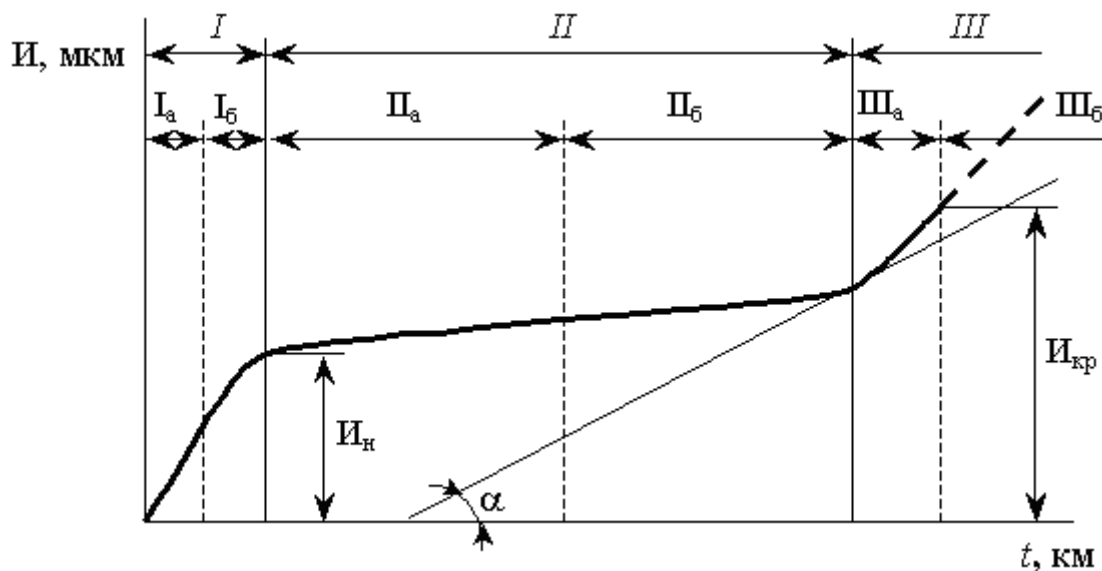


Рис. 5.1. Диаграмма изнашивания деталей автомобилей

На рис. 5.1 символами показаны:

I – период приработки:

I_a – начальная приработка;

I_b – окончательная приработка;

II – период стабильного или нормального изнашивания:

II_a – с замедленной скоростью;

II_b – с увеличенной скоростью;

III – период предельного изнашивания:

III_a – ускоренного изнашивания до критического износа;

III_b – изнашивание после критического износа;

α – угол, характеризующий наклон касательной к графику, характеризующий темп изнашивания;

I_n – начальный износ;

$I_{кр}$ – критический износ.

За период приработки (начального изнашивания) I осуществляется макро- и микрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей и стабилизация показателей технического состояния агрегатов и механизмов, в которые входят эти детали. Для большин-

ства современных двигателей полная приработка по пробегу автомобиля составляет 3–3,5 % от их ресурса до капремонта или списания.

Процесс приработки заключается в том, что выступы на контактирующих поверхностях меняют свою форму, сам материал наклепывается, и в результате этих двух процессов – наклепа и изменения микрогеометрии – создаются условия, обеспечивающие упругий контакт. Реализация упругого контакта на поверхностях трения весьма существенна, потому что в этих условиях имеет место минимальный износ и устойчивое значение коэффициента трения.

5.5.1. Шероховатость приработанных поверхностей. Приработка поверхностей трения характеризуется, как правило, интенсивным изнашиванием трущихся поверхностей, сопровождающимся изменением как физико-механических свойств поверхностных слоев материалов, так и микрогеометрии поверхностей.

В процессе приработки происходит интенсивное разрушение тех неровностей, которые обладают наименьшей способностью "выжить" в данных условиях трения, и образуются новые неровности, отличные от исходных по форме и размерам. Экспериментально установлено, что в различных условиях и разных парах трения после приработки поверхностей всегда устанавливается некоторая "равновесная" (установившаяся) шероховатость (рис. 5.2), характерная для заданных условий трения, которая в дальнейшем не изменяется и воспроизводится в процессе трения. Исходная шероховатость при этом не оказывает влияния на равновесную шероховатость.

Трение приработанных поверхностей характеризуется в основном упругим деформированием неровностей. Равновесная шероховатость поверхности твердого тела зависит от прочности связей, обусловленных молекулярным взаимодействием на контакте, упругих свойств материала тела, удельной нормальной нагрузки и по этим параметрам может быть определена аналитически

$$\Delta = \frac{5,7\tau_0^{1,5}(1-\mu^2)^{0,5}}{E^{0,5}P_c\alpha_{эф}^{1,5}},$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление контакта; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала; $\alpha_{эф} = 2,5\alpha_r$ – коэффициент гис-

терезисных потерь при сложном напряженном состоянии; α_T – коэффициент гистерезисных потерь при трении (безразмерный).

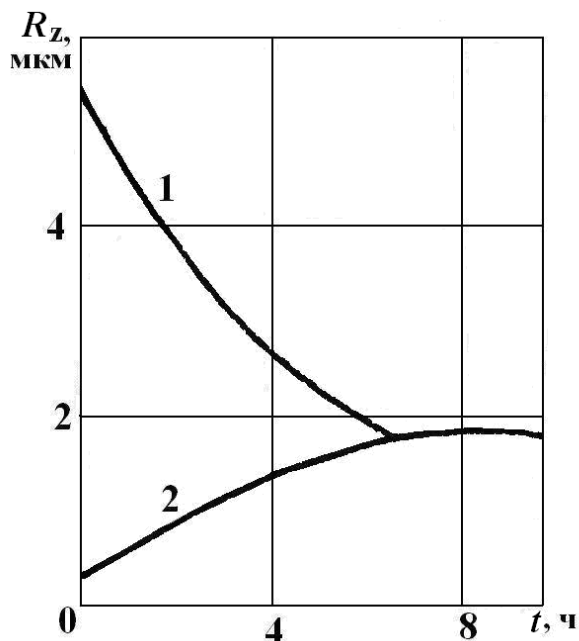


Рис. 5.2. Экспериментальная зависимость изменения шероховатости в процессе приработки образцов

1 – начальное $R_z = 5,4$ мкм;
2 – начальное $R_z = 0,5$ мкм;

Возможность прогнозирования на этапе проектирования узла трения величины равновесной шероховатости позволяет задавать такие виды технологической обработки поверхностей и классы шероховатости поверхности, которые обеспечивают в дальнейшем минимальный износ сопряжения в процессе приработки и сокращают период приработки.

За период стабильного (нормального) изнашивания II происходит умеренно-ускоряющееся или постепенное изнашивание поверхностей деталей двигателя. Этот период называют еще эксплуатационным и рабочим периодом, в течение его двигатель выполняет заданную работу при относительно стабильных технических характеристиках и нормах. Период по пробегу автомобиля составляет до 95 % от ресурса автомобиля до капремонта или списания.

После начала периода предельного изнашивания III наблюдается **прогрессирующее или катастрофическое изнашивание**. Оно происходит после наступления предельного состояния двигателя. Эксплуатация изделия в этот период крайне нежелательна в силу не только резкого возрастания изнашивания поверхностей деталей, но и по соображениям потери эффективности работы, безопасности и эко-

логичности. Резко увеличивается расход топлива и особенно моторного масла – эксплуатация неэффективна. Резко увеличивается токсичность отработавших газов – эксплуатация небезопасна. К тому же в любое время из-за низкого давления в смазочной системе может произойти "заклинивание" двигателя. После так называемого критического износа эксплуатация агрегата, в который входит данная деталь, должна быть прекращена.

5.5.2. Выбор материалов для пар трения. Трущиеся детали в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных, фрикционных, износостойких и антифрикционных материалов обширной номенклатуры. Во многих случаях материалы наносят в виде покрытия, пленок или накладок на остов из конструкционного материала.

Фрикционные материалы – это материалы, которые в контакте с металлической поверхностью развивают высокий, более или менее стабильный коэффициент трения. Они применяются в тормозах и фрикционных муфтах валов. Фрикционные материалы подразделяются на следующие группы:

- 1) органические (дерево, кожа, пробка, войлок);
- 2) металлические (чугун, сталь У6 и У7, марганцовистая сталь);
- 3) асбестокаучуковые;
- 4) пластмассовые (текстолит, асбестотекстолит, фибра);
- 5) металлокерамические на медной и железной основе.

Под износостойкими материалами подразумеваются такие материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения сравнительно мало изнашиваются. К элементам конструкций, материалы которых должны иметь высокую износостойкость, относятся плунжерные пары, цепи, штампы и др. В качестве износостойких материалов служат конструкционные стали, соответствующим образом упрочненные по всему объему или только по рабочим поверхностям детали, специальные стали, чугуны, металлокерамика, резина, пластики.

В поисках путей улучшения работы подшипников скольжения были разработаны антифрикционные сплавы, обладающие малым коэффициентом трения при работе в паре со стальной цапфой. Антифрикционным материалом может быть любой подшипниковый материал, как металлический, так и не металлический, с твердостью

меньшей, чем у сопряженной детали. Антифрикционными свойствами подшипникового материала являются:

- 1) хорошая статическая и динамическая прочность при повышенных температурах;
- 2) способность образовывать прочный граничный слой смазки и быстро восстанавливать его в местах, где он разрушен;
- 3) низкий коэффициент трения при несовершенной смазке;
- 4) отсутствие заедания на валу в случае перерывов подачи смазочного материала;
- 5) высокие теплопроводность и теплоемкость;
- 6) прирабатываемость;
- 7) хорошая износостойкость сопряжения;
- 8) высокая технологичность.

Когда говорят о лучшей антифрикционности какого-либо материала по сравнению с другим, то имеют в виду, что при граничной смазке или другом режиме трения и при прочих равных условиях коэффициент трения этого материала при работе с сопряженной деталью будет меньше, меньше будут повреждения поверхностей, поддерживается более низкая температура на поверхностях трения, имеется меньшая вероятность заедания или налипания материала.

Все трущиеся пары, как правило, должны обладать антифрикционностью, под которой в общем случае следует понимать **комплекс свойств**, которым должно удовлетворять сочетание *трех* тел – материалов деталей трущейся пары и применяемого смазочного материала. Смазочный материал является таким же конструктивным фактором, как и материалы деталей.

5.5.3. Правила сочетания материалов. Выбор материалов при конструировании узлов трения представляет собой трудную задачу, хотя практика машиностроения и располагает большим опытом. Перечислим некоторые руководящие правила при выборе материалов для пар трения скольжения:

1. Сочетать твердый материал с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения. Такая пара металлов хорошо противостоит заеданию и характеризуется высокой надежностью. Хорошие результаты дают пары хром-резина при смазывании минеральным маслом и водой; хром-бронза при пластичных смазочных материалах.

2. Сочетать твердый материал с твердым (сочетание пар из азотированной, хромированной и закаленных сталей). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью. Нанесение покрытий увеличивает надежность работы. Высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкций, тщательная пригонка, улучшение условий смазки значительно расширяют область применения пар трения твердых материалов.

3. Избегать сочетаний мягкого материала по мягкому, а также пар из одноименных материалов. Подобные пары имеют низкую износостойкость и ненадежны в работе. При незначительных перегрузках в парах образуются очаги схватывания и происходит глубокое вырывание материалов с взаимным налипанием их на поверхность трения.

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

5. Применять в качестве фрикционных и антифрикционных материалов пластические массы. Они повышают надежность и срок службы узла трения, снижают массу конструкции и расход дефицитных цветных металлов, уменьшают вибрации.

6. Стремиться путем выбора материалов пары трения, смазочных материалов или присадок к ним создавать при работе пары условия реализации режима избирательного переноса при трении.

7. При выборе материалов учитывать возможность при эксплуатации наводороживания трущихся поверхностей, что резко снижает износостойкость и надежность работы узла трения. Применять материалы, трудно поддающиеся наводороживанию.

8. Поверхность стальных деталей узлов трения при окончательной доводке подвергать финишной антифрикционной безабразивной обработке.

5.5.4. Расположение материалов пар трения по твердости.

Для пары, которая образована скользящими поверхностями, имеющими разные твердость и размеры площадей трения, можно выявить следующие два условия:

$$1) H_1 < H_2; S_1 < S_2;$$

$$2) H_1 > H_2; S_1 < S_2;$$

где: H_1 и H_2 – твердости трущихся поверхностей; S_1 и S_2 – соответствующие площади поверхностей трения.

Пару с расположением материалов, удовлетворяющим первому условию, называют прямой парой трения, а второму условию – обратной парой. В первом случае по большей поверхности скользит более твердое тело, во втором – более мягкое тело.

Пример прямой пары: скольжение закаленного суппорта по чугунной термически необработанной станине.

Пример обратной пары: скольжение хромированного поршневого пальца по поверхности цилиндра из перлитного чугуна.

5.6. Методы измерения износов

В России износы деталей измеряют методом непосредственных геометрических измерений с использованием мерительного инструмента – микрометры, нутромеры, штангенциркули, скобы с индикаторами и без них и т.д. При доводке двигателей на заводе-изготовителе в период их испытаний применяются более точные методы.

Одним из наиболее практичных является метод искусственных баз или метод лунок, вырезанных на поверхности трения детали. В процессе испытаний обмеряют геометрические характеристики лунки на новой детали и после ее демонтажа при определенном пробеге. По разнице в измерениях судят о реальных износах поверхностей (рис. 5.3).

Величины износов Δ вычисляются для плоских поверхностей по выражению:

$$\Delta = \frac{0,125 \cdot (L_1^2 - L_2^2)}{r};$$

а для цилиндрических поверхностей – по выражению:

$$\Delta = 0,125(L_1^2 - L_2^2) \left(\frac{1}{r} \pm \frac{1}{R} \right),$$

где r – радиус лунки; L_1 – длина старой лунки; L_2 – длина изношенной лунки; Δ – искомый износ; “+” в формуле, если поверхность выпуклая; “–” – вогнутая.

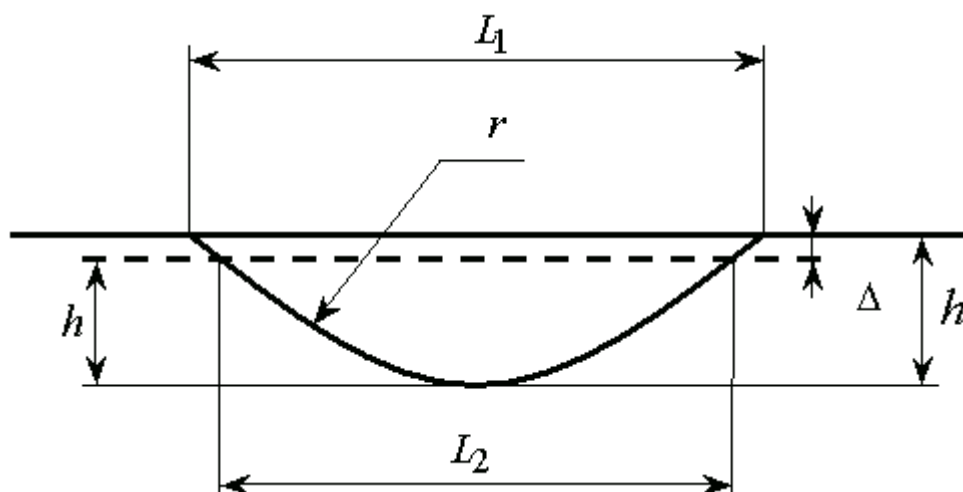


Рис. 5.3. Измерение износов методом лунок

Достаточно широкое применение для измерения износов поверхностей деталей на заводах-изготовителях двигателей нашел метод наложения макропрофилограмм. Он наиболее часто используется при обмере цилиндрических поверхностей и отверстий путем снятия и наложения макропрофилограмм новой и поработавшей деталей (рис. 5.4). Для правильного совмещения макропрофилограмм, снятых с новой и изношенной деталей, на испытываемую поверхность предварительно наносятся отметки твердосплавным инструментом. Разница размеров на профилограммах показывает величины реальных износов поверхности детали в этом сечении.

Выше описаны методы измерения износов деталей, требующие полной или частичной разборки агрегатов или механизмов двигателей. Более практичными для этих целей следует считать методы измерений износов деталей двигателей по косвенным показателям.

Это, в первую очередь, метод спектрального анализа, который в практике носит название – метод "железо в масле". Заключается он в сжигании масляных проб в вольтовой дуге, сборе продуктов сгорания в призму и получении, за счет пучка света, интерференционной картинки, на которой примеси каждого металла имеют свой цвет, а по ширине линий спектра судят о количестве металла в масляной пробе.

Наиболее широкое распространение в мировой практике двигателестроения и эксплуатации нашел метод радиоактивных изотопов. Суть метода основана на изменении величины радиоактивного излучения от трущихся поверхностей при определенных износах после вскрытия радиоактивных вставок тех или иных изотопов. Перед ис-

пытаниями радиоактивные вставки с известной излучательной способностью или чаще разное их количество монтируются в объеме деталей.

Существуют и другие методы измерения износов трущихся деталей, которые, однако, не нашли широкого практического применения.

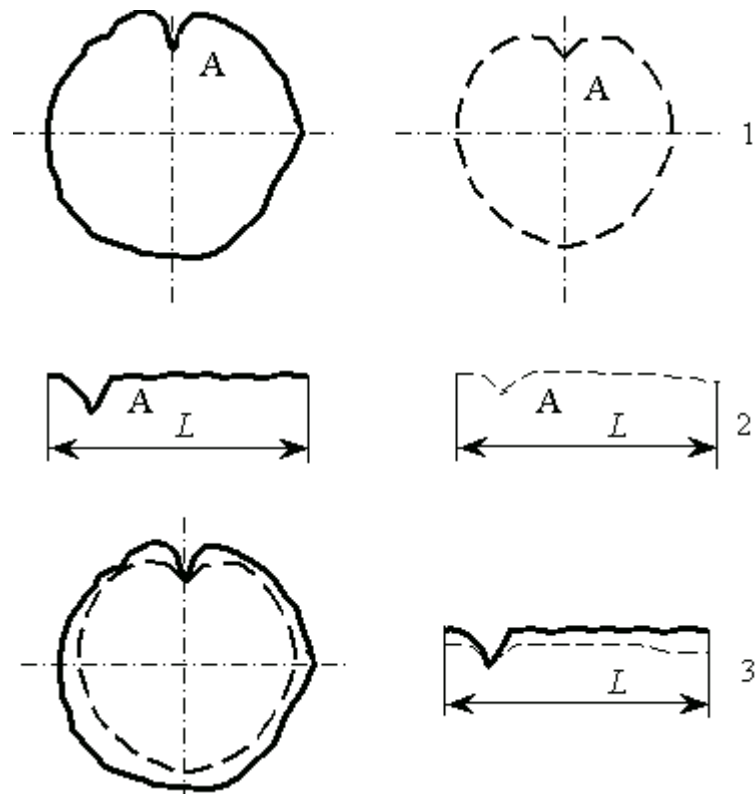


Рис. 5.4. Измерение износов методом наложения макропрофилограмм
 A – метка для совмещения; L – длина измеренного участка; 1 – в поперечном сечении; 2 – в продольном сечении; 3 – совмещенные профилограммы;
 _____ – до изнашивания;
 - - - - - – после изнашивания

6. СМАЗЫВАНИЕ И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6.1. Назначение смазочных материалов

Смазочные материалы предназначены для надежного разделения поверхностей трущихся деталей в условиях граничной, гидродинамической и эластогидродинамической смазки. Одновременно они должны снижать силу трения, интенсивность изнашивания, а также демпфировать удары и вибрации.

Смазочные материалы и системы смазки должны удовлетворять следующим требованиям [4]:

- гарантировано смазывать узел трения в заданных технических условиях эксплуатации интервалах температуры, давления и скорости скольжения;
- поддерживать установленные значения функциональных показателей узла трения в пределах определенного срока эксплуатации и хранения;
- не оказывать вредного воздействия на контактирующие с ними материалы;
- быть экологически и пожаро-, взрывобезопасными.

По агрегатному состоянию смазки делятся на:

- жидкие,
- пластичные (консистентные),
- твердые.

Жидкие смазки – масла – считают вязкими (ньютоновскими) жидкостями, предназначены они для использования в циркуляционных системах смазки. Пластичные смазки применяются для смазывания подшипников качения и шарниров в отсутствие циркуляции. Они закладываются при сборке в полости узлов трения. Твердые смазки используются в узлах, работающих обычно в экстремальных условиях: при высоких температурах, контактных давлениях, в глубоком вакууме, при заметном уровне радиации и др.

6.2. Смазочные масла, их физико-механические свойства и методики оценки характеристик

По своей природе масла (жидкие смазки) делятся на:

- нефтяные (минеральные),

- синтетические,
- растительные,
- смешанные.

Минеральные масла состоят из продуктов перегонки нефти, полученных методами дистилляции из соответствующих фракций нефти либо остаточных после отгонки легких и маловязких фракций. Синтетические масла получают методами химического синтеза на основе силоксанов, эфиров фосфоновых кислот, фтор-, спирто-, глицериновых смесей и т.д. Такие масла обладают специфическими свойствами, например, огнестойкостью, сохранением текучести при низких температурах, слабой испаряемостью, неагрессивностью и др.

По своему назначению масла можно разделить на 4 группы:

- моторные – для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей;
- трансмиссионные – для смазывания зубчатых, цепных и других видов передач;
- промышленные – для смазывания узлов трения промышленного оборудования: станков, прессов, прокатных станов и т.д.;
- масла специального назначения: промывочные, компрессорные, холодильные, турбинные, веретенные, трансформаторные, консервационные и т.д. Отдельно имеются группы гидравлических и смазочно-охлаждающих жидкостей.

Поскольку масла должны обеспечивать гидродинамический режим трения, то их важнейшим показателем является вязкость. В связи с тем, что во время запуска и остановки узла трения, а также в зоне верхней и нижней мертвых точек поршня двигателей внутреннего сгорания имеет место граничное трение, то ответственной характеристикой является их задиростойкость, т.е. смазка должна предотвратить схватывание – самый опасный из видов износа.

В технике масла считаются ньютоновскими жидкостями, и поэтому сила трения в смазочном слое имеет вид

$$F = \eta \frac{dV}{dz} S ,$$

где η – динамическая вязкость масла, V – скорость скольжения, Z – толщина смазочного слоя, S – площадь, на которой происходит сдвиг слоев смазки.

Для определения динамической вязкости используют ротационные вискозиметры. Вискозиметр состоит из двух коаксиальных цилиндров: внутреннего 1 и внешнего 2 (рис. 6.1), установленных в подшипниках корпуса прибора. Внутренний цилиндр приводится в равномерное вращение с угловой скоростью ω . Пространство между цилиндрами заполнено жидкой смазкой 3.

Внутренний цилиндр увлекает за собой примыкающий к нему слой смазки, и за счет внутреннего трения в этом слое вращение передается на наружный цилиндр, который удерживается от вращения пружинным динамометром 4, измеряющим момент трения.

Расчет вязкости по показаниям прибора рассчитывают в следующем порядке.

Поскольку $D-d \ll D$, $S \approx \pi DL$ и скорость слоев жидкости линейно падает при переходе от внутреннего цилиндра ко внешнему, то

$$\frac{dV}{dz} \cong \frac{2V}{D-d} = \frac{\omega D}{D-d},$$

$$\eta = \frac{F(D-d)}{2\pi^2 n D^2 L},$$

здесь n – частота вращения внутреннего цилиндра; L – длина рабочей части цилиндров.

В паспорте смазочных масел обычно указывается кинематическая вязкость, равная отношению динамической вязкости к плотности смазки:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{F(D-d)}{2\rho \pi^2 n D^2 L}.$$

Размерность кинематической вязкости в системе СИ – $\text{м}^2/\text{с}$, однако пользуются меньшей единицей – $\text{мм}^2/\text{с}$. Величина кинематической вязкости входит обычно в обозначение масла в стоксах ($1 \text{ стокс} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). В производственных условиях используют более простые вискозиметры – капиллярные (рис. 6.2). Капилляр 1 длиной l , диаметром d является продолжением сосуда 2, в котором помещается изучаемая смазка 3. Используется формула Пуазейля, выражающая разность давления на границах капилляра:

$$\Delta p = \eta \frac{16\pi V l}{d^4 t}.$$

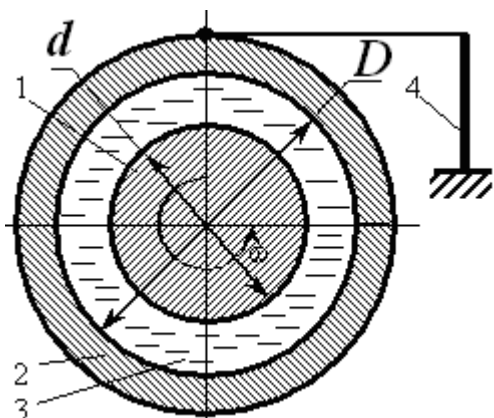


Рис. 6.1. Схема ротационного вискозиметра

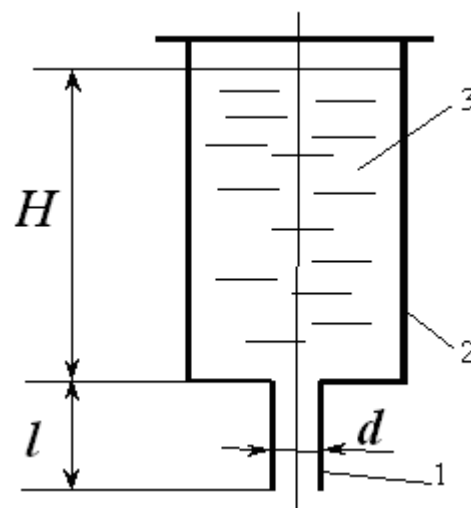


Рис. 6.2. Схема капиллярного вискозиметра

Расчетная формула для определения кинематической вязкости имеет следующий вид:

$$\nu = \frac{d^4 \Delta p}{16\pi \rho V l} t = Ct,$$

здесь $\Delta p = \rho g H$; t – время, за которое через капилляр вытекает заданный объем жидкости V ; C – константа прибора. Таким образом, определение кинематической вязкости сводится к определению времени, за которое вытекает определенный объем масла при заданном перепаде давления.

Вязкость масла сильно зависит от температуры, поэтому по международным и отечественным стандартам вязкость определяют при строго заданной температуре: 50 °С и 100 °С. Для оценки служебных свойств масла с учетом влияния температуры на вязкость используется индекс вязкости И:

$$И = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0 - \nu_m} \cdot 100,$$

где ν_0 – кинематическая вязкость худшего нефтяного масла при 40 °С, у которого вязкость сильно падает с ростом температуры; ν_m – вязкость при 40 °С лучшего рафинированного масла, у которого вязкость слабо зависит от температуры, ν – вязкость испытуемого масла при той же температуре. Если $\nu = \nu_m$, то $И = 100$. Следовательно, все смазки имеют индекс вязкости в интервале от 0 до 100. Как видно из

формулы, индекс вязкости И служит для оценки служебных свойств смазки по ее термостабильности.

На рис. 6.3 показан вид кривых зависимости вязкости от температуры для двух смазок с разным индексом вязкости.

Чем выше индекс, тем меньше меняется вязкость с ростом температуры, тем лучше смазка.

Температурная зависимость вязкости описывается формулой Вальтера:

$$\lg [\lg(v + 0,8)] = A - B \cdot \lg T.$$

Обрабатывая опытные данные в соответствии с этой формулой, легко определить коэффициенты A , B .

Важнейшим показателем является **смазывающая способность**, т.е. способность создавать на поверхности детали тонкую защитную пленку, препятствующую непосредственному контакту, а следовательно, адгезии, задиру и заеданию при металлическом контакте.

Смазывающую способность в основном обеспечивают противозадирные, противоизносные и антифрикционные присадки. Если смазывающая способность исчерпывается, то резко возрастают трение, износ, разрушение рабочих поверхностей вследствие схватывания и заедания.

Стандартные испытания противозадирных свойств масел производят на четырехшариковых машинах (ЧШМ). На рис. 6.4 представлена схема рабочего узла ЧШМ. Ко дну кюветы 1 прикреплены три равномерно расположенных по окружности шарика 2. Сверху на них опирается прикрепленный к пуансону 4 шарик 3, который прижат к шарикам 2 с заданным усилием. Кювета 6 заполняется испытуемым маслом. Шарик 3 через оправку 4 приводится во вращение и скользит по закрепленным шарикам. Кювета 6 расположена на подшипниковой опоре 7, но удерживается от поворота тягой 8, соединенной с динамометром 5.

Динамометр регистрирует момент трения, величина которого записывается на ленте самописца. В тот момент, когда исчерпывается смазывающая способность масла, происходит схватывание верхнего шарика с нижними, момент трения резко увеличивается, что видно по записываемой кривой, а испытание прекращается. Время испытания

используется как мера оценки противоизносной способности масла. Одновременно измеряется диаметр пятна износа, образовавшегося на каждом из 3 закрепленных шаров. На некоторые масла диаметр пятна износа указывается в ГОСТ или паспортных данных. Таким же образом определяется эффективность противоизносных присадок.

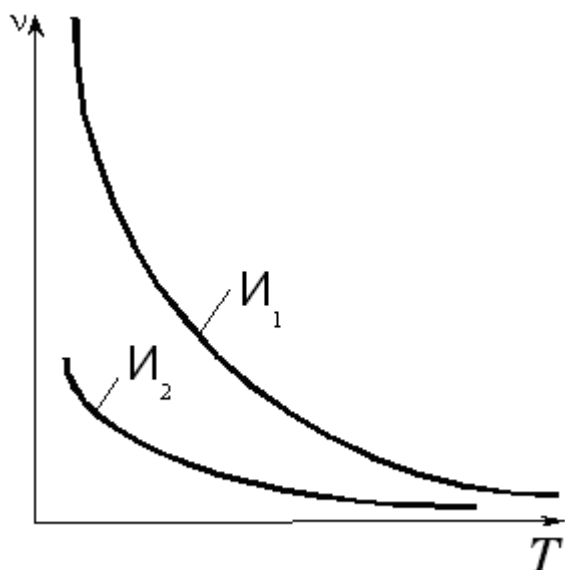


Рис. 6.3. Влияние температуры на вязкость

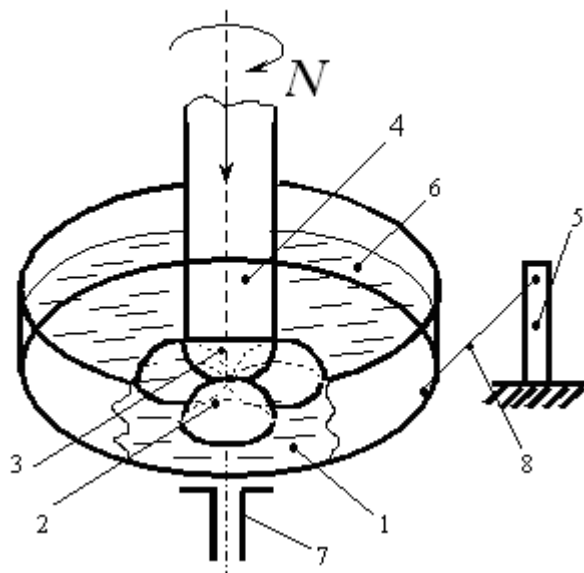


Рис. 6.4. Схема рабочего узла 4-шариковой испытательной машины

6.3. Состав масел и механизм смазочного действия. Роль функциональных присадок к смазочным маслам

В производстве масел различают масла базовые и товарные.

Базовые масла по ГОСТ 18283-72 являются основой для получения товарных масел путем введения в них присадок различного назначения.

Как правило, базовые масла представляют собой продукты различного происхождения: дистиллятные или остаточные минеральные масла, фракции нефтей асфальтового основания, высокополимерные соединения, синтетические и растительные масла.

Так, например, моторное масло М-6 содержит 50 % дистиллятного и 50 % остаточного компонента. Соотношение между обоими компонентами определяет вязкость и индекс вязкости. В последние годы с учетом того, что смазки на нефтяной и синтетической основе и сами технологии их производства экологически опасны, проявляется

большой интерес к экологически чистым маслам растительного происхождения (рапсовое, соевое, кокосовое, подсолнечное и др.).

Для обеспечения служебных свойств смазочных масел разного назначения в базовые масла вводят присадки. Присадки бывают маслорастворимые органического происхождения и тонкоизмельченные твердые порошки органического и неорганического происхождения (наполнители), образующие гелеобразные структуры. Присадки снижают износ, силу трения, предотвращают схватывание, заедание, определяют ряд других служебных показателей.

В качестве антифрикционных и противоизносных присадок широко используются поверхностно активные вещества в виде жирных кислот и их солей – мыл. На рис. 6.5, а, б показана схема взаимодействия молекулы ПАВ с металлом (Me).

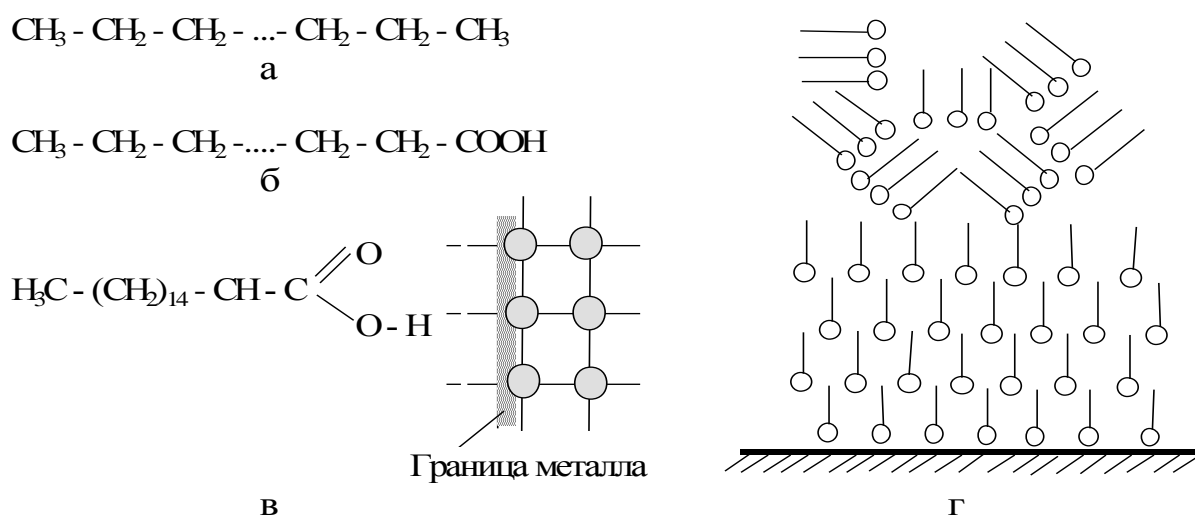


Рис. 6.5. Механизм взаимодействия ПАВ с твердой поверхностью

Жирные кислоты, их соли, спирты являются поверхностно-активными веществами. Активные группы интенсивно притягиваются активными центрами на поверхности металла. При этом боковые группы соседних молекул также взаимодействуют друг с другом. На поверхности твердого тела образуется молекулярный "ворс" (рис. 6.5, в, г). Мономолекулярный слой смазки служит как бы продолжением твердого тела, обладает прочностью и упругостью. К нему примыкают следующие слои молекул, ориентирующихся перпендикулярно к поверхности твердого тела. Однако по мере удаления от границы влияние твердой поверхности постепенно исчезает, твердообразные свойства смазки снижаются. Через несколько слоев молекулы вслед-

ствии теплового движения дезориентируются. Если смазки достаточно лишь для образования монослоя, то картину контакта можно изобразить в виде, представленном на рис. 6.6. В точках контакта из-за высоких давлений монослои продавливаются и образуются площадки металлического контакта $\Delta A_{\text{гм}}$.

Вокруг них возникают зоны контакта с наличием смазочных слоев ($\Delta A_{\text{гс}}$).

Наличие металлического контакта делает режим граничной смазки неустойчивым и ненадежным. Если не происходит переход к гидродинамическому режиму, то следует ожидать неприятных последствий: схватывания и заедания. Поэтому режим граничной смазки, который наблюдается во время пуска и остановки механизмов, должен быть непродолжительным.

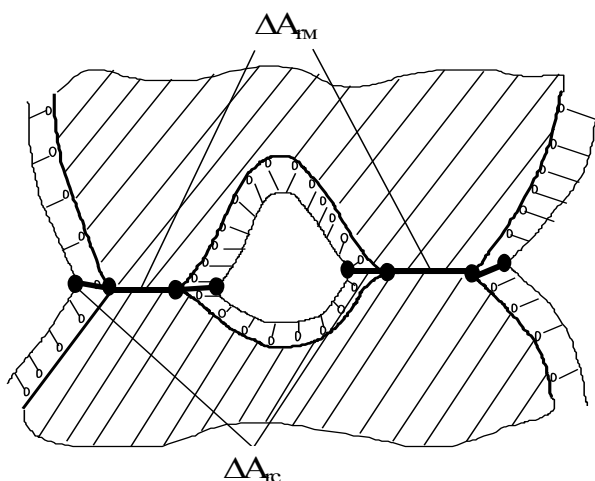


Рис. 6.6. Контакт при наличии монослоев смазки

Для смягчения режима трения в условиях граничной смазки, защиты поверхности детали от разрушения при прорыве молекулярного "ворса", а также в целях расширения диапазона нагрузок, температур и скоростей скольжения присадки содержат такие реагенты, как сера, хлор, фосфор, азот. Присадки, например "Хлорэф-40", представляют собой химически активные соединения, вступающие в реакции с металлом детали. В результате на поверхности возникает пленка из соединений активных элементов с металлом, представляющая собой прочно связанную с основой защитную мягкую прослойку. Однако необходимо учитывать опасность передозировки присадки и вовлечения в химическую реакцию глубинных слоев детали, сопровождающегося разрушением поверхностей сопряжения.

Для повышения вязкости смазки служат растворимые в маслах полимеры: полиизобутилен, полиметакрилат и др.

Особо ценными свойствами обладают присадки многофункционального действия, предотвращающие схватывание и заедание, снижающие трение и износ, например дитиофосфат цинка.

Моторные масла предназначены в основном для смазывания двигателей внутреннего сгорания и работают в условиях тяжелого теплового режима. В двигателях внутреннего сгорания масло заливается в картер и с помощью насоса принудительно подается в сочленения шатунно-кривошипного и газораспределительного механизмов. Поршневая группа смазывается методом разбрызгивания. Температура в зоне первого поршневого кольца в карбюраторных двигателях достигает 270–280 °С, в дизельных – 300–330 °С. В картере средняя температура масла составляет 80–100 °С, в то время как температура газов, прорывающихся в картер, у карбюраторных двигателей 150–450 °С, а в дизельных достигает 500–700 °С. Поэтому масла должны обладать высокой термостабильностью – иметь высокий индекс вязкости.

Смазочные системы двигателей содержат масляные фильтры, в которых накапливаются продукты износа. Фильтры через определенное время эксплуатации подлежат замене. Однако наступает момент, когда масло исчерпывает свои служебные качества. В нем накапливаются продукты окисления, срабатываются присадки. Производится замена масла. Обычно она осуществляется вместе с заменой фильтра. При замене масла целесообразно промыть систему смазки. Для этого используются специальные промывочные масла либо моющие составы, вводимые в отработанное масло до его слива из системы. Моющие составы содержат реагенты, растворяющие нагар, обладающие высокой химической активностью. Поэтому при их применении необходимо строго следовать инструкции, чтобы не повредить рабочие поверхности и уплотнения.

Трансмиссионные масла предназначены для зубчатых, цепных и других механических передач. Они используются в коробках перемены передач, редукторах, дифференциалах мостов автомобилей. В зубчатых передачах контакт между зубьями осуществляется по линии, поэтому контактные давления велики и достигают 2 ГПа, ско-

рость скольжения в цилиндрических передачах составляет до 12 м/с, в гипоидных – до 15 м/с, в червячных – до 20–25 м/с. Температура контакта достигает 150–200 °С. В столь тяжелых условиях эксплуатации смазка должна гарантировать разделение контактирующих поверхностей, предотвратить задир и заедание, снизить износ и питтинговое разрушение. Кроме перечисленных требований смазка должна иметь стабильную вязкость, низкую температуру застывания, хорошие противокоррозионные свойства. Лучшее противопиттинговое действие имеют смазки на синтетической основе.

Служебные свойства в основном обеспечивают присадки. Наряду с растворимыми в качестве присадок используются стабильные суспензии графита, дисульфида молибдена и других нерастворимых компонентов, используются также химически активные соединения типа "Хлорелф-40", а также антиокислительные и антипенные присадки.

Трансмиссионные масла обычно подаются в область контакта путем переноса из картера за счет окунания зубьев в масло либо путем разбрызгивания за счет создания смазочного "тумана". Для повышения эффективности смазывающего действия в последние годы разработаны способы подачи масла в зону зацепления с использованием магнитного поля постоянных магнитов. Для этого в масло добавляется коллоидно-дисперсный порошок ферромагнетика, а вблизи от зоны зацепления размещается пара магнитов. Смазка, поступающая в зону зацепления, удерживается там магнитным полем и обеспечивает стабильное смазывание.

Пластичные смазки, которые также называют консистентными, представляют собой густые мази, предназначенные для смазывания подшипников качения различных типов, шарниров, рычажных, кулачково-эксцентриковых систем и др. В отличие от жидких масел пластичные смазки обладают сдвиговой прочностью, поэтому силу сопротивления смазки сдвигу представляют в виде

$$\tau = \tau_c + \eta \frac{dV}{dz}.$$

Пластичные смазки обладают следующими достоинствами: удерживаются на наклонной и вертикальной поверхностях, не выдавливаются из контакта, обладают хорошей смазочной способностью в довольно широком интервале температуры, способны герметизиро-

вать узел, обеспечивают малый расход смазки, позволяют упростить конструкцию узла, снизить металлоемкость, сократить затраты на обслуживание. К числу недостатков относятся: низкий теплоотвод, отсутствие удаления продуктов изнашивания. Они больше, чем жидкие, склонны к окислению и распаду.

Пластичными смазками набиваются полости узлов трения. Замена смазки производится во время техобслуживания. В ряде узлов предусмотрено пополнение запаса смазки с помощью пресс-масленок.

Основой пластичных смазок служат нефтяные, синтетические или растительные масла. По типу загустителей смазки делятся на 4 группы:

- на мыльных загустителях;
- на неорганических загустителях;
- на органических загустителях;
- на углеводородных твердых маслорастворимых загустителях (парафины, церезины, битумы).

В первом случае используются соли жирных кислот – мыла, содержащие небольшое количество воды. Во втором и третьем случаях используются коллоидно-дисперсные порошки минералов и полимеров. На поверхностях частиц сорбируются слои макромолекул смазки. Частицы вместе с прикрепившимися к ним активными группами молекул смазки связываются друг с другом за счет промежуточных молекул. В результате возникает гелеобразная структура.

В состав смазок входят жидкие масла (50–90%), загустители, модификаторы, присадочные добавки и наполнители. В качестве модификаторов, предназначенных для стабилизации структуры, используются смолы, жирные кислоты, вода. Присадочные добавки обеспечивают смазывающее действие и являются теми же, что используются в маслах. Наполнители – это твердые смазки (халькогениды металлов): дисульфиды, диселениды, дителлуриды, а также тальк, слюда, порошки мягких металлов (свинца, олова, кадмия, меди). Применение порошков мягких металлов позволяет создать на поверхностях трения защитные пленки, предохраняющие сопряжения от схватывания и заедания. Ту же роль выполняют твердые смазки.

Ряд смазок имеет специальное назначение: электроконтактные (проводящие), судовые (стойкие к речной и морской воде), резьбовые, шахтные, канатные, консервационные и т.д.

Наиболее часто применяется на автотранспорте смазка "ЛИТОЛ-24", представляющая собой смесь нефтяных масел, загущенную литиевым маслом. Масло содержит противозадирные, противопиттинговые и другие присадки. "ЛИТОЛ-24" применяется для смазки подшипников качения, шарниров, тихоходных подшипников скольжения и зубчатых передач. Смазки "Фиол-1", "Фиол-2у" разработаны фирмой "Фиат" и предназначены для смазки игольчатых подшипников и шлицевого соединения карданного вала. Содержат дисульфид молибдена. Применяются в автомобилях, выпускаемых ВАЗом.

Смазка "Шрус-4" содержит антиокислительную, противоизносную, противозадирную присадки, а также твердосмазочную добавку. Используется для смазывания шарнирных соединений автомобилей. Наиболее распространенная пластическая смазка общемашиностроительного назначения "Солидол-С" представляет собой нефтяную жидкую основу, загущенную мылом. Модификатором структуры является вода, содержание которой составляет 2–4 %. Применяется для смазки тихоходных передач, подшипников, шарниров, ползунов, эксцентриков и т.д. В настоящее время по своим параметрам "Солидол-С" является технически устаревшей смазкой.

Твердосмазочные материалы. К твердосмазочным материалам (ТСМ) относятся вещества, наносимые на поверхность деталей в виде пленок, имеющие сдвиговую прочность значительно меньшую, чем у материала детали. Иными словами, эти вещества должны обеспечить положительный градиент сдвиговой прочности в направлении внутренней нормали к границе твердой поверхности: $dt/dn > 0$.

В качестве твердых смазок используют:

- слоистые вещества с резкой анизотропией прочности, обусловленной особенностями кристаллического строения;
- тонкие пленки мягких металлов, их окислов;
- пленки пластмасс;
- химические соединения, образованные на поверхности детали путем обработки активными реагентами, содержащими хлор, фосфор, азот, серу и др.

ТСМ применяются:

при работе в условиях, когда жидкие и пластичные смазки не применимы из-за специфики эксплуатации узла, например в агрессивных средах;

в сопряжениях, работающих в условиях малых скоростей скольжения и высоких контактных давлений;

при высоких температурах, когда масла разлагаются, а также при низких температурах (криогенных), когда масла замерзают;

в условиях, когда недопустимо загрязнение окружающего пространства, при работе в жидких средах, в вакууме;

когда необходимо смазывать неметаллические поверхности, например керамику;

в скользящих электрических контактах с использованием проводящих материалов: графит, легкоплавкие мягкие металлы;

при воздействии радиации.

Наиболее распространенным типом ТСМ являются слоистые материалы: графит, дисульфиды, деселениды молибдена и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Словарь-справочник** по трению, износу и смазке деталей машин / Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун. – Киев: Наук. думка, 1979. – 185 с.
2. **ГОСТ 23.002-78.** Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Введ. 1978-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
3. **Еникеев, Р. Д.** Двигатели внутреннего сгорания. Основные термины и русско-английские соответствия: учеб. пособие / Р. Д. Еникеев, Б. П. Рудой. – М.: Машиностроение, 2004. – 384 с.
4. **Трибология.** Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский; под ред. Д. Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2000. – 268 с.
5. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. **Трение, изнашивание и смазка** / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М.: Машиностроение. – Т.1, 1978. – 400 с.; Т.2, 1979. – 324 с.
7. **Шустер, Л.Ш.** Основы триботехники: учеб. пособие / Л. Ш. Шустер; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 1994. – 107 с.
8. **Основы трибологии** (трение, износ, смазка): учебник для технич. вузов / Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский и др.; под ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
9. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника: учебник для вузов / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1999. – 366 с.
10. **Шустер, Л. Ш.** Триботехника в реновации: учеб. пособие / Л. Ш. Шустер; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 118 с.
11. **Загайко, С. А.** Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учеб. пособие / С. А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	13
1. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	15
1.1. Физико-механические свойства поверхностных слоев	15
1.2. Строение поверхностного слоя	18
1.2. Показатели качества поверхности	19
2. КОНТАКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ	24
2.1. Три площади контакта	24
2.2. Взаимное контактирование деталей	26
3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	29
3.1. Отличие внешнего трения от внутреннего	29
3.2. Зависимость силы трения от относительного перемещения	30
3.3. Молекулярно-механическая природа фрикционного взаимодействия	32
3.4. Виды взаимодействия твердых тел при контакте	34
3.5. Правило положительного градиента сдвигового сопротивления	40
4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ ПРИ ДВИЖЕНИИ.....	45
4.1. Виды и режимы трения	45
4.2. Основные закономерности процессов контактного взаимодействия скользящих поверхностей	48
5. ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	52
5.1. Механизм изнашивания	52
5.2. Основные виды изнашивания	55
5.3. Физическая модель износа	72
5.4. Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания.....	76
5.5. Диаграмма изнашивания деталей машин	79
5.6. Методы измерения износов.....	85
6. СМАЗЫВАНИЕ И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	88
6.1. Назначение смазочных материалов.....	88
6.2. Смазочные масла, их физико-механические свойства и методики оценки характеристик.....	88
6.3. Состав масел и механизм смазочного действия. Роль функциональных присадок к смазочным маслам	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	101

Учебное издание

ЗАГАЙКО Сергей Андреевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Подписано в печать 08.04.2011. Усл. печ. л. 6,6. Уч.-изд. л. 6,5.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет