

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет»

Н.Г. Полюшкин

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ, ИЗНОСА И СМАЗКИ

Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 110800.62 «Агроинженерия»

Красноярск 2013

ББК 40.72-082я73
П 53

Рецензенты:

А.Г. Ермолович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. теоретической механики СибГТУ

А.Е. Митяев, канд. техн. наук, доц., зав. каф. прикладной механики Политехнического института СФУ

П 53 **Полюшкин, Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки:** учеб. пособие / Н.Г. Полюшкин; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2013. – 192 с.

В учебном пособии приведены сведения по теоретическим основам трения, изнашивания и смазки, триботехническим материалам (конструкционным и смазочным). Рассмотрены основные виды изнашивания узлов трения, а также методы определения износа. Представлены различные способы повышения износостойкости трибосопряжений (конструктивные, технологические).

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 110800.62 «Агроинженерия».

ББК 40.72-082я73

© Полюшкин Н.Г., 2013

© ФГБОУ ВПО «Красноярский
государственный аграрный
университет», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ВВЕДЕНИЕ В ТРИБОТЕХНИКУ	8
1.1. Общие сведения.....	8
1.2. Основные термины и определения.....	10
1.3. Проблемы, связанные с триботехникой.....	14
1.4. Понятия о надежности машины.....	15
1.5. Сроки службы трущихся деталей машин.....	18
1.6. Убытки от трения и износа в машинах.....	19
1.7. Основные задачи триботехники и перспективы развития.....	20
Контрольные вопросы к разделу 1	23
2. ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ И ЕГО СВОЙСТВА	24
2.1. Общие сведения о контакте соприкасающихся поверхностей.....	24
2.2. Параметры шероховатости.....	25
2.3. Контакт поверхностей тел.....	27
2.4. Остаточные напряжения.....	29
2.5. Структурные и фазовые превращения.....	33
2.6. Строение поверхностного слоя.....	33
2.7. Физико-химические свойства поверхностного слоя....	36
2.7.1. Поверхностный слой и силы, действующие в его элементах	36
2.7.2. Адгезия.....	38
2.7.3. Поверхностная энергия.....	39
2.7.4. Адсорбция и хемосорбция.....	40
2.7.5. Адсорбционный эффект понижения прочности.....	43
2.7.6. Пленки на металлических поверхностях.....	46
Контрольные вопросы к разделу 2	47
3. ТРЕНИЕ	48
3.1. Общие сведения о трении.....	48
3.2. Виды трения.....	49
3.2.1. Трение скольжения.....	50
3.2.2. Трение качения.....	53
3.2.3. Сухое трение.....	55
3.2.4. Граничное трение.....	57

3.2.5. Жидкостное трение.....	58
3.2.6. Смешанное трение.....	61
3.2.7. Диаграмма Герси-Штрибека.....	62
Контрольные вопросы к разделу 3	64
4. ИЗНАШИВАНИЕ ПАР ТРЕНИЯ.....	65
4.1. Основные характеристики изнашивания.....	65
4.2. Предельный и допустимый износ.....	66
4.3. Механизм изнашивания.....	68
4.4. Стадии изнашивания пар трения.....	69
4.5. Разрушение поверхностей трения.....	71
4.6. Виды изнашивания. Классификация видов изнашивания.....	72
4.6.1. Абразивное изнашивание.....	73
4.6.2. Усталостное изнашивание.....	78
4.6.3. Изнашивание вследствие пластической деформации.....	82
4.6.4. Кавитационное изнашивание.....	84
4.6.5. Молекулярно-механическое изнашивание.....	86
4.6.6. Коррозионно-механическое изнашивание.....	92
4.6.7. Изнашивание при фреттинг-коррозии.....	95
4.6.8. Окислительное изнашивание.....	97
4.6.9. Водородное изнашивание.....	98
4.6.10. Изнашивание при избирательном переносе.....	102
4.6.11. Эрозионное изнашивание.....	105
Контрольные вопросы к разделу 4	107
5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА.....	108
5.1. Классификация методов измерения износа.....	108
5.2. Метод микрометрических измерений.....	109
5.3. Определение износа по потере веса.....	110
5.4. Метод профилографирования.....	111
5.5. Метод искусственных баз.....	113
5.6. Определение износа по содержанию продуктов износа в масле.....	116
5.7. Метод поверхностной активации.....	117
5.8. Индуктивные датчики.....	117
5.9. Метод тензометрирования.....	118
Контрольные вопросы к разделу 5	120

6. МАТЕРИАЛЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ.....	121
6.1. Общие сведения о материалах.....	121
6.2. Требования, предъявляемые к материалам пар трения.....	122
6.3. Выбор материалов пары трения.....	123
6.4. Правила сочетания материалов.....	124
6.5. Методика подбора материалов пар трения.....	127
Контрольные вопросы к разделу 6	129
7. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ.....	130
7.1. Конструкторские способы повышения износостойкости.....	130
7.1.1. Оценка и выбор схемы узла трения.....	131
7.1.2. Замена внешнего трения внутренним трением упругого элемента.....	132
7.1.3. Замена трения скольжения трением качения.....	133
7.1.4. Выбор зазоров в сопряжениях.....	133
7.1.5. Защита рабочих поверхностей от загрязнений.....	134
7.2. Технологические методы обеспечения износостойкости узлов трения.....	135
7.2.1. Обработка резанием.....	137
7.2.2. Обработка поверхности пластическим деформированием	138
7.2.3. Термическая обработка.....	139
7.2.4. Термомеханическая обработка стали.....	142
7.2.5. Химико-термическая обработка.....	143
7.2.6. Диффузионная металлизация.....	146
7.2.7. Напыление поверхностей.....	148
7.2.8. Наплавка поверхностей.....	149
7.2.9. Финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей.....	150
Контрольные вопросы к разделу 7	152
8. СМАЗЫВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	154
8.1. Роль смазочных материалов.....	154
8.2. Виды смазки и смазочных материалов.....	154
8.3. Физико-химические характеристики смазочных материалов.....	156
8.4. Присадки к смазочным материалам.....	159

8.5. Жидкие смазочные материалы.....	163
8.5.1. Моторные масла.....	164
8.5.2. Трансмиссионные масла.....	167
8.5.3. Индустриальные масла.....	169
8.5.4. Масла специального назначения.....	172
8.6. Пластичные смазочные материалы.....	173
8.6.1. Мыльные пластичные смазочные материалы.....	175
8.6.2. Углеводородные пластичные смазочные материалы.....	177
8.6.3. Органические пластичные смазочные материалы.....	178
8.6.4. Неорганические пластичные смазочные материалы..	179
8.7. Металлоплакирующие смазочные материалы.....	179
8.8. Твердые смазочные материалы.....	182
8.8.1. Композиционные смазочные материалы.....	186
8.9. Самосмазывающиеся материалы.....	188
Контрольные вопросы к разделу 8	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	191
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	192

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность автомобильного, сельскохозяйственного и других видов транспорта во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, происходящими в узлах машин.

Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, потере точности 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. Кроме того, трение также оказывает положительное влияние – работа механизмов торможения, сцепления, движения колес. Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения.

Проблемы трения, износа и смазки в машинах изучает наука трибология. Современная наука трибология изучает трение, износ, смазку в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении. Кроме того, трибология охватывает теоретические и экспериментальные исследования физических, химических, биологических и других явлений, связанных с трением. Прикладными задачами по повышению износостойкости и управлению трением за счет применения новых конструкций узлов, материалов и эксплуатационных приемов занимается триботехника.

К настоящему времени трибология окончательно сформировалась как самостоятельная отрасль знаний. На сегодняшний день во многих развитых странах имеются научные трибологические центры, ведется подготовка инженеров-трибологов. Решение проблем трения, изнашивания и смазки позволяет добиться высокого экономического эффекта: снижение потребления энергии, затрат на смазочный материал и техническое обслуживание.

Знание основ триботехники является важным аспектом при подготовке специалистов по инженерным специальностям. Полученные знания позволяют правильно рассчитать и применить конструкцию трибосопряжения; подобрать соответствующие материалы пар трения; назначить оптимальные режимы работы узла трения; выбрать наиболее эффективные технологические методы изготовления, обработки и упрочнения трибологических материалов; обеспечить надлежащие режимы эксплуатации, ремонта и обслуживания машин.

1. ВВЕДЕНИЕ В ТРИБОТЕХНИКУ

1.1. Общие сведения

Курс триботехники дает представление о природе и закономерностях внешнего трения и изнашивания шероховатых поверхностей; современных теориях трения; методах определения коэффициентов трения; расчете и прогнозировании интенсивности изнашивания; видах, природе и механизме абразивного изнашивания; значении смазок и присадок при трении и изнашивании, методике подбора материалов для трущихся деталей; методах повышения износостойкости, трении и изнашивании в особых условиях (в агрессивных средах, вакууме, при низких и высоких температурах); методах и оборудовании, применяемых для исследований трения и изнашивания.

Большой вклад в развитие триботехники внесли ученые С.Б. Айнбиндер, В.А. Белый, Ф.П. Боуден, Д.Н. Браун, Д.Н. Гаркунов; Б.В. Дерягин, Ю.Н. Дроздов, Ю.А. Евдокимов, А.Ю. Ишлинский, И.В. Крагельский, Н.М. Михин, М.А. Левитин, К. Ипрамов, А.С. Проников, П.А. Ребиндер, Д. Тейбор, М.Н. Хрущов, А.В. Чичинадзе и многие другие.

Ценный вклад в изучение трения в XV в. внес Леонардо да Винчи. Среди бесчисленных научных достижений и первая формулировка законов трения (1519 г.). Леонардо да Винчи установил, что сила трения зависит от материала и не зависит от площади соприкасающихся поверхностей, она прямо пропорциональна нагрузке, прижимающей одно трущееся тело к другому и может быть уменьшена путем введения промежуточных тел качения (шариков или роликов) или смазочных материалов между трущимися поверхностями. Леонардо обосновывает невозможность создания вечного двигателя, одной из причин считает трение. Впервые ввел понятие коэффициента трения, показал, что сила трения зависит от материала трущихся поверхностей, качества их обработки, изобрел роликовый и шариковый подшипники.

Модель Леонардо да Винчи была переоткрыта через 180 лет французом Г. Амонтоном (1663–1705 гг.). В 1699 г. Амонтон впервые сформулировал закон зависимости трения от величины нагрузки, нормальной к поверхности трения (рис. 1.1).

Амонтон-трение – это подъем одного тела по поверхности другого.

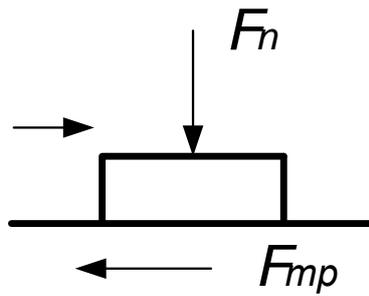


Рис. 1.1. Схема трения

$$F_{тр} = F_n \cdot f, \quad (1.1)$$

где F_n – нормальная нагрузка, Н;
 f – коэффициент трения.

До сих пор именно эта формула является основополагающей.

Создателем науки о трении считается Шарль Кулон (1781 г.). В труде «Теория простых машин» он охватил основные аспекты трения: сопротивление скольжению, качению, стягиванию, обобщил закон Амонтона и показал, что часто трение слабо зависит от нагрузки (или не зависит), т.е.

$$F_{тр} = F_n \cdot f + A, \quad (1.2)$$

где A – часть трения, зависящая от сцепляемости поверхностей.

Кулон показал, что трение зависит от многих факторов (нагрузка, скорость, материалы, шероховатость, смазка, температура). Исследуя трение качения, Кулон вывел формулу сопротивления перекачиванию F_k :

$$F_k = X \cdot F_n / r, \quad (1.3)$$

где X – коэффициент трения качения, имеет размерность длины;
 r – радиус перекачивания тела, м.

Эта формула используется и сейчас, хотя ее многократно пытались опровергнуть.

Б. Томпсон (1798 г.) показал, что механическая энергия при трении не исчезает, а превращается в тепло.

Закон Кулона лег в основу современных теорий трения, разработанных Ф. Боуденом, Д. Тейбором и И.В. Крагельским. Обе теории базируются на представлении о двойственной природе трения. Предполагается, что трение имеет две составляющие: механическую (де-

формационную) и молекулярную (адгезионную), и они просто суммируются.

$$f = F_{mp} / F_n = (F_m + F_d) / F_n = f_m + f_d, \quad (1.4)$$

где F_m и F_d – соответственно молекулярная (адгезионная) и механическая (деформационная) составляющие силы трения, Н;

f_m и f_d – соответственно молекулярная (адгезионная) и механическая (деформационная) составляющие коэффициента трения.

Представители английской школы (Боуден Ф.П. и др.) считают главным в трении адгезионное взаимодействие двух тел, образование мостиков сварки. Разрушение этих мостиков обуславливает силу трения и износ. Они считают, что объемное деформирование поверхностных слоев играет незначительную роль, для металлов оно всегда пластическое, при этом коэффициент трения является величиной постоянной, его значение определяется отношением сопротивления на срез к твердости менее прочной составляющей пары трения.

Многие другие (в т.ч. отечественные) ученые природу трения объясняют несколько иначе: в нормальных условиях трения образование мостиков сварки между двумя телами может быть устранено смазкой, пленками окислов. Первенствующую роль играет объемное деформирование микронеровностей, непрерывно образующихся под нагрузкой. Износ наступает в результате их усталостного разрушения из-за многократной их деформации. Неровности деформируются как упруго, так и пластически. В этих условиях коэффициент трения для данной пары варьируется (меняется) в зависимости от давления, размера поверхности, температуры, таким образом, f – комплексная характеристика, зависит от свойств тел, геометрических очертаний микронеровностей и так далее. Обе точки зрения существуют в реальных процессах.

Создание общей теории трения, в которой деформационная и молекулярная составляющие окажутся не постулатами, а приближенными результатами, актуальная проблема современной трибологии.

1.2. Основные термины и определения

Трибология занимает достаточно специфичное место в проблемах машиноведения, поэтому ниже приведены основные требования и понятия, относящиеся к данной области знаний. Они представлены

исходя из требований ГОСТ 27674–88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения», а также понятий, широко распространенных в литературе, связанной с триботехническими исследованиями.

Трибология – наука о трении, смазке и изнашивании контактирующих тел. Название происходит от греческих слов «трибос» – трение и «логос» – наука. Термин впервые употреблен П. Джостом в 1966 г. В докладе специальной комиссии министерства образования и науки Великобритании.

В трибологии можно выделить следующие научно-технические разделы: триботехнику, трибофизику, трибохимию, трибомеханику, триботехнологию, трибомониторинг (трибометрия и трибодиагностика), трибоинформатику и др.

Триботехника – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин. В последние годы в триботехнике получили развитие новые разделы: трибохимия, трибофизика и трибомеханика.

Трибохимия – изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой: проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса материалов, воздействие на поверхность деталей химически активных веществ, выделяющихся при трении из смазки и трущихся поверхностей.

Трибофизика – это направление современной физики, изучающее процессы и явления, происходящие в реальных системах тел, где тела контактируют друг с другом в условиях взаимного перемещения.

Трибоматериаловедение – этот раздел изучает связь между составом, строением, свойствами и закономерностями поведения материалов, а также их изменениями при трении и изнашивании.

Трибомеханика – изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении, законы рассеивания энергии, импульса, механическое подобие, колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и т.п.

Триботехнология – это направление, предметом исследования и разработки которого являются технологические методы *инженерии поверхностей* трибосопряжений. В современной трибологии термин «инженерия поверхности» определяет быстро развивающуюся область технологий воздействия на поверхность: нанесение покрытий, поверхностная обработка и модификация.

Трибомониторинг – раздел трибологии, включающий трибометрию и трибодиагностику, охватывает методы и средства измерения основных параметров фрикционного взаимодействия: силы (моменты), трения, износа, температуры, шероховатости, площади касания, контактной деформации и др.

Трибометрия – раздел о методах испытаний на трение и изнашивание деталей трибосопряжений и узлов трения. В соответствии с целью и условиями проведения, испытания могут быть *модельными* – в условиях лаборатории, *стендовыми* – в условиях, близких к практическим, и *натурные* – в реальных или приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Трибодиагностика – раздел трибологии о методах и средствах непрерывного контроля состояния фрикционных параметров деталей и узлов машин.

Трибоинформатика – раздел трибологии о закономерностях получения трибологической информации, ее преобразования, хранения и передачи для использования в науке, образовании и производстве.

К общим понятиям триботехники относятся следующие термины.

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

Трибосопряжение (ТС) – две функционально связанные детали (вал-втулка, два зубчатых колеса и др.). ТС согласно ЕСКД может быть отнесено к сборочной единице или изделию, состоящего из двух составных частей.

Триботехническая система (ТТС) – сложная термодинамическая система, образуемая из нескольких трибосопряжений и узлов трения, а также промежуточной среды и части окружающей среды, в которой происходит преобразование энергии механической в другие виды и передача преобразованной энергии тепла.

Триботехнические характеристики материалов.

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.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Относительная износостойкость – отношение интенсивности изнашивания одного материала к интенсивности изнашивания другого в одинаковых условиях.

Интенсивность изнашивания – отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.

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 выделения тепла.

Скорость изнашивания – равна интенсивности изнашивания минус отношение износостойкости к интервалу времени.

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

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

Смазывание – подведение смазочного материала к поверхности трения.

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

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

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

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

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

Трение качения – трение движения двух твердых тел, при котором их скорости одинаковы по величине и направлению, по крайней мере в одной в точке зоны контакта.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

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

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

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

Поверхность трения – поверхность тела, участвующая в трении.

Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

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

1.3. Проблемы, связанные с триботехникой

Повышенный износ деталей в сочленениях в одних случаях нарушает герметичность рабочего пространства машины (например, в поршневых машинах), в других – нарушает нормальный режим смазки, в третьих – приводит к потере кинематической точности механизма. В результате изнашивания понижается мощность двигателя, увеличивается расход горюче-смазочных материалов, падает производительность компрессоров, возникает возможность утечки ядовитых и взрывоопасных продуктов через сальники и уплотнения, понижаются тяговые качества транспортных машин, ухудшается управление самолетами и автомобилями (понижается безопасность движения), уменьшается производительность, снижается точность и качество обработки изделий на металлорежущих станках и т.д.

Износ инструмента и рабочих органов машин, помимо снижения производительности, повышает расход энергии. Например, с износом и затуплением зубьев ковша экскаватора уменьшается сечение

срезаемой стружки грунта, увеличивается сопротивление резанию последнего, требуется больший путь для заполнения ковша.

Износ и повреждение поверхностей снижают сопротивление усталости деталей и могут служить причиной их разрушения даже при незначительных концентраторах напряжений и весьма низких номинальных напряжениях. Повышенный износ нарушает нормальное взаимодействие деталей в узлах, может вызвать значительные дополнительные нагрузки, удары в сопряжениях и вибрации, стать причиной внезапных разрушений. С повышенным износом нередко связан недопустимый шум машин.

Заедание или заклинивание деталей может привести к аварийной ситуации. Так, заедание лопатки ротора масляного насоса может вызывать его заклинивание, прекращение подачи масла к подшипникам и аварию машины.

В многозвенных механизмах даже небольшой износ отдельных элементов может суммироваться на ведомом звене и нарушать нормальное функционирование механизма.

Износ цилиндропоршневой группы двигателя увеличивает засорение воздуха отработавшими газами: 100 изношенных автомобилей загрязняют воздух отработавшими газами как 125 новых автомобилей.

Примечательно, что масса механизма или машины по мере их износа уменьшается незначительно.

Например, автомобильный двигатель средней мощности после полного износа имеет потерю массы не более 1 % от исходной, а грузовой автомобиль средней грузоподъемности – не более 3 кг.

1.4. Понятия о надежности машины

В соответствии с ГОСТ 13377-75 *надежность* – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Термин «объект» является наиболее общим наименованием изделия: дорожной машины, оборудования или отдельной сборочной единицы.

В процессе эксплуатации объект может находиться в одном из следующих состояний: исправном, работоспособном, неисправном.

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Параметры, характеризующие выполнение функций, обуславливают эксплуатационные показатели изделия: производительность, мощность, тягово-скоростные характеристики, параметры рабочего процесса и прочее.

Неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической документацией. Различают неисправности, не приводящие к отказам (нарушение лакокрасочного покрытия, износ режущей кромки рабочего органа), и неисправности, ведущие к возникновению отказа (трещина металлоконструкции рамы, изгиб лопасти вентилятора системы охлаждения двигателя).

Срок службы машины – календарная продолжительность эксплуатации изделия до разрушения или другого предельного состояния. Предельное состояние может устанавливаться по изменениям параметров, условиям безопасности, экономическим показателям, необходимости первого капитального ремонта и т. п.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Для каждого объекта признаки (критерии) отказов установлены нормативно-технической документацией.

В зависимости от причин возникновения различают:

- конструкционные отказы, возникшие в результате нарушения установленных правил конструирования;
- производственные отказы, причиной возникновения которых является нарушение установленного процесса изготовления или ремонта изделия;
- эксплуатационные отказы, причиной возникновения которых является нарушение установленных правил или условий эксплуатации машины.

По характеру возникновения различают следующие отказы:

- отказы, происходящие в первый, короткий период эксплуатации, приработочные отказы. Их появление обусловлено дефектами изготовления и сборки и неудовлетворительным заводским контролем;
- отказы, вызванные износом деталей. Их появление на определенной стадии эксплуатации неизбежно и указывает на процесс старения механизма;

- внезапные отказы, возникающие вследствие совпадения неблагоприятных факторов: наличия внутренних скрытых дефектов в материале, превышения расчетных силовых и термических нагрузок и т.п. и сопровождающиеся разрушением деталей;

- систематические отказы обусловлены наличием конструктивных и технологических недостатков, присущих изделиям данной модели, в результате которых в некоторых деталях постепенно накапливаются изменения, приводящие на определенной стадии работы изделия к преждевременному предельному износу или поломке этих деталей.

В зависимости от способа устранения отказа все объекты разделяют на ремонтируемые (восстанавливаемые) и неремонтируемые (невосстанавливаемые). К ремонтируемым относят объекты, которые при возникновении отказа ремонтируют и после восстановления работоспособности снова вводят в эксплуатацию. Большинство машин и оборудования, а также их элементы являются ремонтируемыми объектами.

Неремонтируемые объекты после возникновения отказа заменяют. К числу неремонтируемых элементов многих машин относят подшипники качения, тросы, оси, пальцы, крепежные детали и т.д. Восстановление этих элементов экономически нецелесообразно, так как затраты на ремонт достаточно велики, а обеспечиваемая при этом долговечность значительно ниже, чем у новых деталей.

Надежность объекта характеризуется безотказностью его работы, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

Под *наработкой* подразумевают продолжительность или объем работы объекта, измеряемые в часах, километрах, кубических метрах или других единицах. Это свойство особенно важно для элементов системы управления, тормозных устройств и других механизмов, отказ которых может привести к аварии или к длительному простоем дорогостоящего оборудования.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и текущих ремонтов.

Предельное состояние объекта – состояние, при котором дальнейшая его эксплуатация должна быть прекращена из-за неустраняемого нарушения требований безопасности или неустраняемого ухода

заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой. Объект, достигший своего предельного состояния, направляют в капитальный ремонт или списывают.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Под устранением отказа подразумевают восстановление работоспособности объекта путем ремонта (для ремонтируемых элементов) или замены (для неремонтируемых элементов) отказавшего элемента. Долговечность и ремонтпригодность являются основными свойствами, определяющими уровень надежности машин и оборудования.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования. Это свойство более важно для машин сезонного использования и сменного рабочего оборудования: снегоочистителей, уплотняющих машин, грейферного оборудования, кусторезов и др.

Совокупность перечисленных свойств определяет способность объекта выполнять заданные функции, сохраняя установленные эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение установленного срока, т.е. надежность изделия в эксплуатации.

1.5. Сроки службы трущихся деталей машин

Выход из строя деталей и рабочих органов машин при нормальных условиях эксплуатации является следствием физического износа разных видов: усталостных разрушений, ползучести материалов, механического износа, коррозии, эрозии, кавитации, старения материала и др.

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин орудий, которые эксплуатируются в абразивной и агрессивной средах, и деталей транспортных машин, работающих в условиях грязи и пыли. Например, ресурс дробящих плит составляет в среднем 4...6 месяцев, зубьев ковшей экскаваторов, скреперов и бульдозеров, шнеков – 6...8 месяцев. На дробилке массой 6 т при дроблении высокоабразивных пород расходуется в год 17 т дробящих плит. Контрольные сроки службы до капитального ремонта угольных комбайнов – 8...12 месяцев, а конвейеров в угольных шахтах – 2...3 года. Дизели,

установленные на мощных автосамосвалах, требуют капитального ремонта после 1500...2000 ч работы, т.е. через 6...8 месяцев. Бортовые шестерни тракторов работают до замены не более 2000...2500 ч, срок службы транспортных трансмиссий до ремонта составляет 2500...3500 ч.

За сезон работы тракторов на песчаных почвах приходится заменять два-три комплекта гусениц, что в среднем обходится в 50 % стоимости нового трактора. Лемех тракторного плуга в среднем обрабатывает до полного износа всего 15...20 га почвы, это вынуждает ежегодно изготавливать для сельского хозяйства свыше 20 млн лемехов, не говоря уже о том, что на тяжелых почвах режущая кромка лемеха требует ремонта через 4...6 га работы плуга. Годовая потребность в запасных звеньях приводных цепей сельскохозяйственных машин составляет около 100 млн штук.

Для двигателей автомобилей, тракторов и комбайнов следует отметить, что за весь срок службы их ремонтируют до 5 раз. Ресурс двигателя после ремонта по сравнению с ресурсом нового двигателя составляет 40...50 %.

1.6. Убытки от трения и износа в машинах

Большинство машин (85...90 %) выходит из строя по причине износа деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость:

- для автомобилей в 6 раз;
- для самолетов до 5 раз;
- для станков до 8 раз.

На ремонт тракторов задействовано в 4 раза больше производственных мощностей, чем на их изготовление. Легковой автомобиль, имеющий массу 1000 кг, становится непригодным для ремонта, если потеря его массы от износа составит 1 кг. Проанализировано и подсчитано, что для списания трактора Т-130 на запасные части для ремонта и технического обслуживания нужно израсходовать столько же металла, сколько он сам весит – $12 \cdot 10^3$ кг.

Причинами малого ресурса двигателей после ремонта являются:

- низкое качество обработки поверхностей деталей; станки ремонтных предприятий не обеспечивают той точности обработки, которую имеют детали, изготовленные на заводах серийной продукции;

- отсутствие средств надежной промывки деталей перед сборкой, запыленность абразивной пылью сборочных цехов, в целом – невысокая культура производства;

- плохая приработка деталей после ремонта, отсутствие современных испытательных стендов, приборов, контролирующих процесс приработки, загрязненность абразивами смазочных и гидравлических систем;

- недостаточная специализация производства на ремонтных предприятиях по сравнению с ее уровнем на заводах серийной продукции, что не позволяет разрабатывать и реализовывать наиболее рациональные технологические процессы; результатом этого является в первую очередь малый срок службы деталей.

Велики потери в результате снижения мощности двигателей от износа деталей. По данным С.А. Серова, суммарная мощность двигателей внутреннего сгорания, установленных только на автомобилях, тракторах и различных самоходных установках, достигает в нашей стране 0,5 млрд кВт.

Изношенные двигатели внутреннего сгорания при работе значительно загрязняют атмосферу отработавшими газами по сравнению с новыми двигателями.

Большие материальные потери народное хозяйство терпит от повышенного трения в узлах машин. Известно, что более половины топлива, потребляемого автомобилями, тепловозами и другими видами транспорта, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в подвижных сочленениях. В текстильном производстве на преодоление сопротивления трению затрачивается около 80 % потребляемой энергии. Низкий КПД многих машин обусловлен главным образом большими потерями на трение. Так, КПД глобоидного редуктора, устанавливаемого в лифтах, металлорежущем оборудовании, шахтных подъемниках и др., в приработанном состоянии составляет только 0,65...0,70, а в такой распространенной паре, как винт-гайка, всего лишь 0,25.

1.7. Основные задачи триботехники и перспективы развития

Интенсивное развитие машиностроения непрерывно стимулирует деятельность специалистов в области триботехники, ставя перед ними новые задачи. Развитие космических исследований, атомной

энергетики требует обеспечения работоспособности трущихся сопряжений в широком диапазоне температур (от криогенных до 1500 °С), в вакууме, агрессивных средах, жидкостях, не обладающих смазочным действием, в том числе жидких металлах, в условиях интенсивной радиации. Необходима разработка материалов для работы подшипников в биологически активных средах.

Общей проблемой для ряда отраслей промышленности: автомобильной, тракторной, судостроительной и др. – является повышение надежности, долговечности и коэффициента полезного действия поршневых двигателей внутреннего сгорания. Новые задачи возникли в связи с созданием более экономичных и экологически чистых двигателей, работающих на водородном топливе, адиабатических и автомобильных газотурбинных двигателей.

Триботехника, как и другие науки, непрерывно развивается. Этапы ее развития связаны с созданием корабельной техники, металлообрабатывающей промышленности, железнодорожного транспорта, автомобильной промышленности, авиации и космонавтики.

Из анализа опубликованных трудов конференций, семинаров и др. можно подразделить вопросы развития триботехники на следующие части, которые содержат самостоятельные этапы:

- учение о трении и изнашивании деталей машин;
- конструктивные решения вопросов трения и изнашивания;
- технологические методы повышения износостойкости деталей;
- эксплуатационные мероприятия по повышению долговечности машин.

Триботехнике как науке приходится решать различные задачи, из них можно выделить наиболее фундаментальные:

- исследование механизмов трения и изнашивания трибосопряжений и моделирование процессов, протекающих в области контактного взаимодействия при трении;
- разработка методов управления этими процессами с целью повышения долговечности и надежности трибосопряжений;
- разработка расчетных методов оценки контактной жесткости, сил трения и долговечности трибосопряжений при заданных эксплуатационных условиях.

Основные прикладные задачи триботехники это:

- обеспечение требуемых значений контактной жесткости, износостойкости, долговечности трибосопряжений при заданных условиях эксплуатации;

- снижение энергетических потерь на трение (опоры), обеспечение высокой энергоемкости (тормоза, фрикционные передачи);
- экономия материалов за счет снижения их износа;
- решение экологических проблем.

В настоящее время в развитии триботехники появились новые перспективные направления развития, такие как:

- развитие теории трения и изнашивания на микро- и наномасштабных уровнях;
- разработка присадок к маслам с использованием нанотехнологий;
- компьютерное моделирование сложных трибосистем;
- создание новых смазочных материалов и покрытий, использование эффекта «суперсмазки»;
- развитие методов расчета на долговечность трибосопряжений с многослойными нанопокрывтиями с учетом параметров поверхностного рельефа;
- построение моделей механики фрикционного взаимодействия с учетом изменения свойств поверхностных слоев в процессе трения и изнашивания, в том числе с учетом протекающих в зоне контактного взаимодействия химических реакций, влияющих на свойства поверхностных слоев и скорость их деформирования;
- построение моделей контактного взаимодействия с учетом массопереноса вещества с одной поверхности пары трения на другую;
- объединение подходов трибохимии и трибомеханики (учет влияния напряженного состояния в контакте на протекание химических реакций);
- разработка методов управления физическими, механическими и химическими процессами на поверхностях трения;
- изучение роли геометрии поверхности (параметров ее шероховатости и субшероховатости) в протекании процессов фрикционного взаимодействия, особенно для наноструктурированных материалов;
- развитие многомасштабного моделирования процессов фрикционного взаимодействия;
- развитие ионно-плазменных технологий;
- разработка присадок к маслам с использованием нанотехнологий;
- развитие средств трибодиагностики и трибомониторинга, включая встроенные и портативные системы;
- изучение трения и износа в суставах живых существ, а также износа зубов.

Важным фактором в развитии трибологии является разработка и использование нового оборудования для проведения микро- и наноисследований, испытательных машин для исследования триботехнических свойств материалов, оборудования и приборов для изучения тонких поверхностных слоев (и самих поверхностей), высокоэффективных присадок к смазочным маслам.

Борьба с трением и износом машин требует комплексных исследований теоретических основ трения, износа и смазки, совершенствования инженерных методов расчета узлов трения при проектировании машин, создания новых материалов, а также новых принципов конструирования и новых технологий изготовления узлов трения и материалов для них, подготовка высококвалифицированных специалистов в области трения.

Контрольные вопросы к разделу 1

1. Что изучают трибология и триботехника?
2. Кем впервые сформулированы законы трения? Дайте определение силе трения.
3. В чем заключается двойственная природа трения?
4. Основные триботехнические характеристики материалов.
5. Дайте определение надежности. Чем характеризуется надежность?
6. Состояния объектов в процессе эксплуатации.
7. Что такое срок службы машины?
8. Что может оказывать влияние на ресурс деталей и органов машин?
9. Что такое отказ? Назовите виды отказов.
10. Фундаментальные задачи триботехники.

2. ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ И ЕГО СВОЙСТВА

2.1. Общие сведения о контакте соприкасающихся поверхностей

Первичной проблемой при изучении трения является контактирование соприкасающихся поверхностей. В понятие «контактирование» входит взаимодействие поверхностей, принадлежащих твердым телам, под действием относительного смещения и сжимающих сил с учетом их отклонения от идеальной формы и влияния среды (газы и смазочные материалы), присутствующей в зоне контакта.

В процессе формообразования деталей на их поверхности появляется шероховатость – ряд чередующихся выступов и впадин сравнительно малых размеров.

Шероховатость может быть следом от резца или другого режущего инструмента, копией неровностей форм или штампов, может появляться вследствие вибраций, возникающих при резании, а также в результате других факторов.

Влияние шероховатости на работу деталей машин многообразно. Она оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхностного слоя, следовательно, детали в целом.

К показателям, характеризующим эксплуатационные свойства поверхностного слоя, относятся: контактная жесткость; прочность детали; характер процесса трения между сопрягаемыми поверхностями в паре трения; изменение посадки; антикоррозионная стойкость поверхности; плотность и герметичность соединения; адгезионная способность к гальваническим и лакокрасочным покрытиям; удобство содержания поверхностей в чистоте и т.п.

Для оценки шероховатости используются оптические, щуповые, электронно-микроскопические и другие методы. Промышленное применение приобрел щуповой метод. Суть его заключается в том, что по поверхности скользит игла с радиусом закругления 2...10 мкм, значительно меньшим, чем радиус закругления вершин микронеровностей. Колебания иглы в вертикальном направлении преобразуются в электрические сигналы, поступающие в микропроцессор, который выдает в цифровом виде основные характеристики профиля. В России профилографы серийно выпускает завод «Калибр», а за рубежом наиболее распространены приборы фирмы «Хьюлет-Паккард».

В последние годы разработаны методы получения профилограмм на растровом, электронном и сканирующем (туннельном) микроскопах. Разрешение в этом случае достигает нанометров. Удастся регистрировать шероховатость молекулярных размеров (субмикрощероховатость), а также микродефекты кристаллической структуры.

2.2. Параметры шероховатости

Согласно ГОСТ 215142-82, *шероховатостью поверхности* называют совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины.

Базовая длина l – длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. *Базовая линия (поверхность)* – линия (поверхность) заданной геометрической формы, определенным образом проведенная относительно профиля поверхности и служащая для оценки геометрических параметров шероховатости.

Базой для отсчета отклонений профиля является *средняя линия профиля $t-t$* – линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратичное отклонение профиля до этой линии минимально.

Рассмотрим основные характеристики микрогеометрии более подробно. В соответствии с действующим стандартом установлены следующие параметры шероховатости (рис. 2.1).

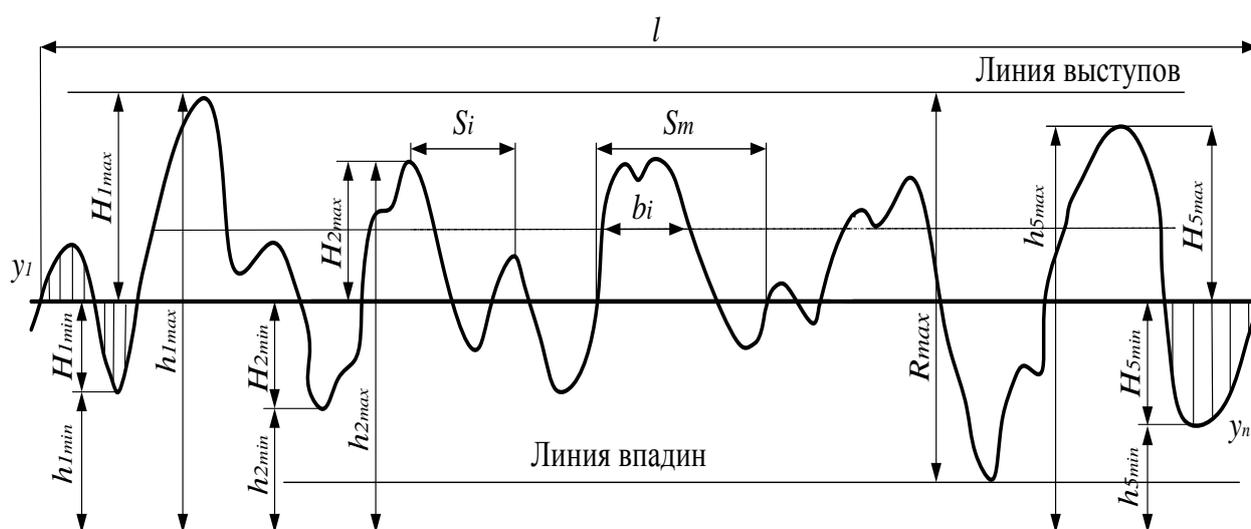


Рис. 2.1. Профилограмма поверхности

1. *Среднее арифметическое отклонение профиля* R_a – это среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений в пределах базовой длины.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (2.1)$$

где l – базовая длина, мм;

y – отклонение профиля (расстояние между любой точкой профиля и базовой линией $m-m$), мм.

2. *Высота неровностей профиля по десяти точкам* R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины.

$$R_z = (\sum_{i=1}^5 H_{imax} + \sum_{i=1}^5 H_{imin})/5, \quad (2.2)$$

где H_{imax} – отклонение пяти наибольших максимумов профиля, мм;

H_{imin} – отклонение пяти наибольших минимумов профиля, мм.

3. *Наибольшая высота неровностей профиля* R_{max} – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины

4. *Средний шаг неровностей профиля* S_m – среднее значение шагов местных выступов профиля в пределах базовой длины.

5. *Средний шаг местных выступов* S – среднее значение шагов местных выступов профиля, находящихся в пределах базовой длины.

6. *Относительная опорная длина профиля* t_p – отношение опорной длины профиля к базовой длине.

$$t_p = \left(\frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i \right) \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

где b_i – длина отрезков, отсекаемых на уровне, мм.

Кроме вышперечисленных количественных параметров, стандартом установлены два качественных параметра.

1. *Способ обработки*. Указывается в том случае, когда шероховатость поверхности следует получить только определенным способом.

2. *Тип направления неровностей.* Указывается только в ответственных случаях, когда необходимо по условиям работы детали или сопряжения.

Стандартом предусмотрено 14 классов шероховатости. В таблице 2.1 для примера приведены данные шероховатости наиболее ответственных деталей двигателя внутреннего сгорания автомобилей.

Таблица 2.1

Характеристики шероховатости

Деталь	Класс	R_a , мкм	r , мкм	R_{max} , мкм
Гильза цилиндра	9	0,04	100	1,2
Коленвал (шейки)	9	0,05	500	1,6
Поршневое кольцо	9	0,02	270	0,48

2.3. Контакт поверхностей тел

Для осуществления процесса трения твердых тел необходимым условием является контакт их поверхностей или взаимодействие этих тел. Характер явлений, происходящих при контакте поверхностей твердых тел, определяется физико-механическими, химическими свойствами и микрогеометрией этих поверхностей.

Взаимный контакт деталей происходит по вершинам и выступам шероховатости, которая деформируется под действием внешней нагрузки.

Возможны следующие виды деформации выступов: упругие, упруго пластические без упрочнения, упруго пластические с упрочнением.

При изучении контакта поверхностей И.В. Крагельский выделил *номинальную, контурную и фактическую площади контакта.*

Номинальная площадь контакта A_n соответствует номинальным сопрягаемым размерам деталей. Это справедливо для деталей с идеально гладкой поверхностью.

Однако контакт твердых тел дискретен и пятна фактического контакта A_f неравномерно распределены по поверхности. Это связано с шероховатостью контактирующих поверхностей. *Площадь фактического контакта* поверхностей состоит из множества дискретных малых площадок, расположенных на различных высотах пятна 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. Она зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя, а также от нагрузки.

Площадь фактического контакта составляет от 0,0001 до 0,1 номинальной площади касания. Даже с учетом высоких нагрузок площадь фактического контакта не превышает 40 % номинальной площади.

Фактическая площадь контакта возрастает при увеличении нагрузки, радиуса закругления вершин ее неровностей, уменьшении шероховатости поверхности; кроме того, она несколько увеличивается при длительном действии нагрузки. С увеличением упругих характеристик, предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей фактическая площадь контакта уменьшается.

При взаимодействии двух разных материалов физические свойства более мягкого и геометрия поверхности более твердого из тел определяют фактический контакт.

При наличии между поверхностями трения тонкой пленки меди площадь фактического контакта увеличивается в 10...100 раз, при этом снижая износ трущихся поверхностей.

Вследствие волнистости контактирующих поверхностей фактические пятна контакта будут возникать преимущественно на вершинах волн. Каждая такая область, ограниченная контуром, в пределах которого существуют фактические пятна контакта, представляет собой элементарную *контурную площадку*. Сумма элементарных площадок представляет контурную площадь контакта A_K .

От размера пятен контакта зависят размер частиц износа, время взаимодействия на единичном контакте и температура, развиваемая при трении. Среднее расстояние между пятнами фактического контакта влияет на частоту взаимодействия пятен при трении.

Схема контакта поверхностей двух тел показана на рисунке 2.2.

Давления, возникающие в силовом контакте двух тел, рассчитываются по следующим зависимостям.

Номинальное давление

$$P_h = P_a = N/A_a, \quad (2.4)$$

где N – нормальное давление, Н.

Контурное давление

$$P_k = N/A_k. \quad (2.5)$$

Фактическое давление

$$P_r = N/A_r. \quad (2.6)$$

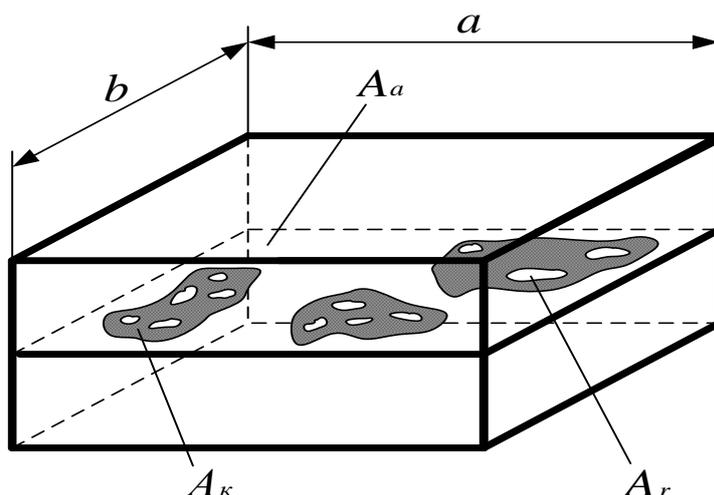


Рис. 2.2. Схема контакта поверхностей тел: A_a – номинальная площадь контакта ($A_a = a \cdot b$); A_k – контурная площадь ($A_k = 5 \dots 15 \%$ от A_a); A_r – фактическая площадь единичного пятна контакта ($A_r = 0,0001 \dots 0,1 \%$ от A_a).

От размера пятен контакта зависят размер частиц износа, время взаимодействия на единичном контакте и температура, развиваемая при трении. Среднее расстояние между пятнами фактического контакта влияет на частоту взаимодействия пятен при трении.

Фактическое давление P_r на контакте очень велико. Это часто приводит к пластической деформации выступов. В ряде случаев в зоне контакта возникает ползучесть, вследствие чего характеристики контакта во времени могут изменяться при неизменности прилагаемой внешней нагрузки. Эти свойства контакта особенно сильно проявляются с повышением температуры в зоне контакта.

2.4. Остаточные напряжения

В результате действия на металл внешних нагрузок положение атомов в кристаллической решетке выходит за минимальный уровень

кинетической энергии, нарушая структуру решетки и приводя к определенному напряженному состоянию материала.

После устранения нагрузки только часть атомов занимает исходное положение, остальные же будут смещены, из-за чего возникают остаточные напряжения.

Остаточными называют напряжения, существующие в теле при отсутствии внешних силовых воздействий на него. Наличие этих напряжений обусловлено также неравномерностью температуры по объему тела, образованием во время нагрева или охлаждения новых структур с иной плотностью, наличием включений и др.

В зависимости от размера области, в которой возникают напряжения, различают остаточные напряжения первого, второго и третьего рода.

Остаточные напряжения первого рода – микронапряжения. Эти напряжения уравниваются в границах областей, размеры которых соизмеримы с размерами тела. В плоскопараллельных слоях напряжения первого рода постоянны, они изменяются в направлении, перпендикулярном к поверхности.

Напряжения второго рода, называемые микронапряжениями, занимают области, соизмеримые с объемом отдельных кристаллитов или групп кристаллитов. Они существуют в плоскостях скольжения и среди блоков мозаичной структуры.

Остаточные напряжения третьего рода изменяются в субмикроскопических областях. Они уравниваются в небольших группах атомов, лежащих на границах блоков мозаичной структуры в плоскостях скольжения и т. п.

Внутренние напряжения, как правило, являются следствием определенного технологического процесса, поэтому различают литейные, сварочные, закалочные, шлифовочные и другие остаточные напряжения.

Остаточные напряжения, которые сохраняются в детали длительное время, алгебраически складываясь с рабочими (внешними) напряжениями, могут их усиливать или ослаблять.

Остаточные напряжения, возникающие в поверхностных слоях при механической обработке, могут относиться к напряжениям как I, так и II рода. Типичные эпюры остаточных напряжений I рода в поверхностном слое приведены на рисунке 2.3.

Наибольшие напряжения у поверхности могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Особенно опасны растягивающие

напряжения, которые приводят к понижению усталостной прочности и износостойкости (для некоторых видов изнашивания).

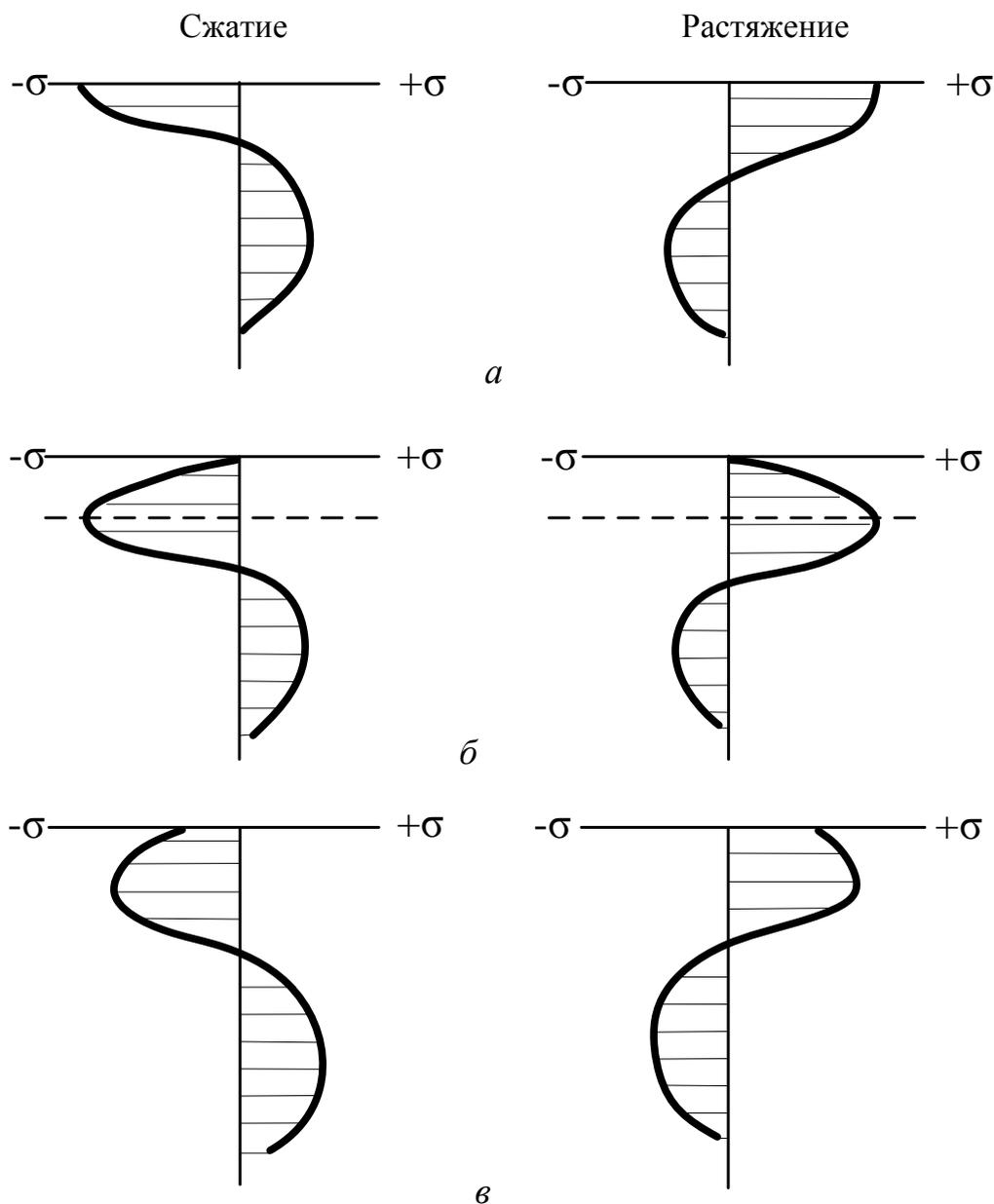


Рис. 2.3. Эпюры остаточных напряжений

Характер эпюры остаточных напряжений может быть таким, что максимальные напряжения возникают непосредственно у поверхностного слоя (рис. 2.3, а), на некоторой глубине, причем у поверхности они равны нулю (рис. 2.3, б) или имеют вид, представленный на рисунке 2.3, в.

Характер эпюры остаточных напряжений и их величина в сильной степени зависят от условий и режимов резания при механической

обработке и от методов поверхностного упрочнения. Разнообразие эпюр объясняется одновременным действием различных факторов и в первую очередь сочетанием силовых и температурных воздействий.

Пластическая деформация металла увеличивает его удельный объем, поэтому поверхностные слои, пластически деформированные при обработке резанием или при процессах упрочнения, стремясь увеличиться, встречают сопротивление недеформированного слоя металла. В результате в наружном слое появляются напряжения сжатия, а в остальной части – напряжения растяжения. Это имеет место в том случае, когда поверхностный слой не находится в состоянии ползучести, вызванном температурными воздействиями. При разогреве поверхностного слоя выше температуры, соответствующей состоянию ползучести металла, внутренних напряжений в нем не возникает. При охлаждении в наружном слое возникают растягивающие напряжения, а в нижележащих слоях – напряжения сжатия (см. рис. 2.3, а – справа), т.е. картина остаточных напряжений противоположна той, которая имеет место при отсутствии влияния температуры.

Так как оба фактора – температурный (состояние ползучести) и силовой (пластическая деформация) – действуют одновременно, то знак остаточного напряжения в наружном слое зависит от того, какой из этих факторов преобладает.

Исследования показали, что в образовании остаточных напряжений при шлифовании доминирующую роль играет тепловой фактор. При фрезеровании тепловой фактор уже не играет такой роли, особенно при низких и средних скоростях резания.

Следует заметить, что напряженное состояние зависит от формы и размеров детали, режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Большое влияние на характер эпюры остаточных напряжений оказывают методы поверхностного упрочнения и защитные покрытия. Установлено, что в поверхностных слоях деталей после закалки ТВЧ, поверхностного наклепа, азотирования и цементации действуют значительные сжимающие напряжения с максимумом у поверхности, а детали после такой обработки обладают повышенной усталостной прочностью. После нанесения большинства гальванических покрытий или при обезуглероживании поверхностей стальных деталей в поверхностных слоях возникают остаточные напряжения растяжения (см. рис. 2.3, а – справа).

2.5. Структурные и фазовые превращения

Пластические деформации вызывают изменения микроструктуры. Беспорядочно расположенные в структуре металла кристаллические зерна под влиянием пластической деформации приобретают однородную ориентацию. Более глубокие изменения возможны при обработке металлов, подверженных закалке. Высокий поверхностный нагрев и быстрое охлаждение обуславливают структурные и фазовые превращения. Например, в процессе шлифования закаленной и отпущенной стали образуется поверхностный слой аустенитно-мартенситной структуры из вторичного закаленного металла. Слой с измененной структурой при нормальных условиях шлифования имеет почти равномерную структуру. Аналогичные превращения наблюдаются и при точении.

Местные фазовые и структурные превращения поверхностного слоя шлифуемой детали называются шлифовочными прижогами. Причина их образования интенсивное тепловыделение на небольшом участке поверхностного слоя. Также прижоги могут возникать из-за вибрации шлифовального круга, неправильной установки детали на центрах и т.п. В области прижогов образуются остаточные напряжения. Прижоги, концентрируя напряжения, снижают сопротивление усталости и износостойкость. Фазовые и структурные превращения при обработке инструментом возможны только для металлов с метастабильной структурой.

При холодной пластической деформации металла повышаются его твердость и предел прочности. Это явление получило название упрочнение металла и наклеп.

2.6. Строение поверхностного слоя

Качество поверхности деталей характеризуется микро- и макрогеометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Рассматривая строение поверхностного слоя, следует иметь в виду, что оно резко отличается от основного материала, так как несет на себе следы технологического процесса обработки, в результате которого, как правило, образуется дефектный слой с искаженной структурой. При эксплуатации изделия постоянно идет процесс изменения свойств поверхности из-за силовых, температурных, окислительных и других воздействий.

Так, при обработке металлов резанием возникновение в поверхностном слое новых образований происходит в результате действия двух противоположных процессов – упрочнения (наклепа) в результате воздействия на поверхность усилий резания и разупрочнения (снятия наклепа) в результате влияния температуры резания. В разных условиях превалирует влияние то одного, то другого фактора.

При наклепе происходит изменение свойств металла, повышается сопротивление деформации и твердость, понижается пластичность. Степень наклепа, а также толщина наклепанного слоя зависят от режима резания.

Глубину наклепанного слоя можно определить по изменению микротвердости, которая в поверхностных слоях всегда выше. О степени наклепа можно судить по отношению твердости поверхностных слоев и исходного материала H_{max}/H_0 (рис. 2.4, а).

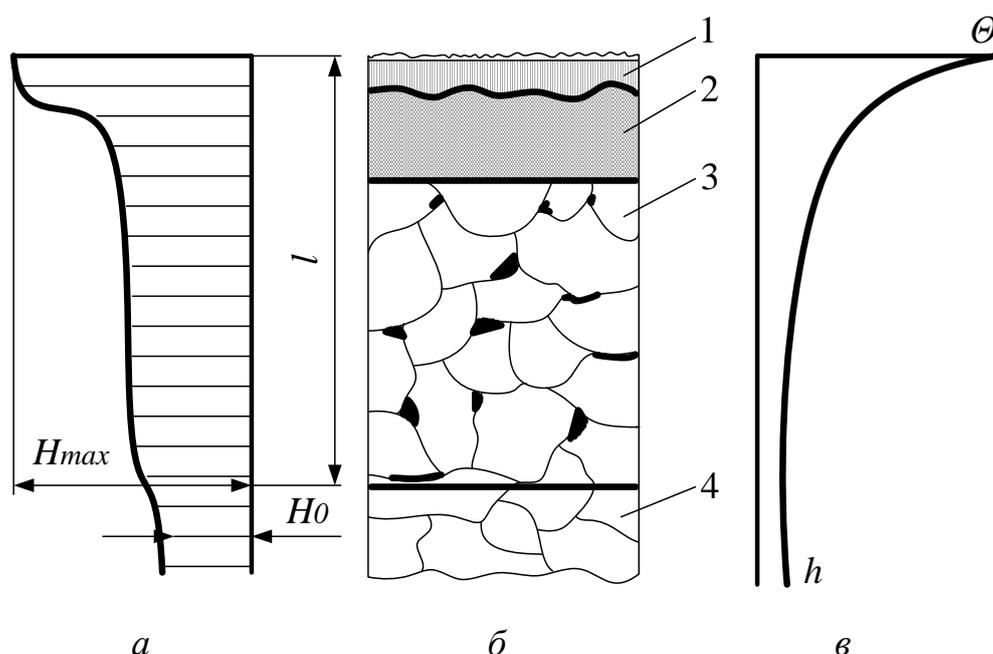


Рис. 2.4. Структура поверхностного слоя:

а – изменение твердости по глубине слоя; б – структура поверхностного слоя; в – изменение температуры по глубине при резании и трении

Изменения в поверхностном слое происходят не только вследствие процессов упрочнения и разупрочнения, но и из-за структурных превращений и окислительных процессов, которые могут происходить в зоне температурных влияний по глубине h (см. рис. 2.4, в).

Важным фактором, влияющим на структуру поверхностного слоя, являются окислительные процессы, которые быстро развиваются

ся в новых поверхностях, появившихся в процессе обработки. У большинства металлов на поверхностях образуются тонкие окисные пленки. Так как пленка находится в напряженном состоянии, то при ее росте возможны разрывы пленки, и она приобретает пористое строение. При трении поверхностей деталей машин тонкие слои подвергаются в зоне контакта многократным воздействиям нормальных и тангенциальных напряжений, в сочетании с температурными влияниями и действием среды приобретают рельеф, характерный для данных условий эксплуатации. Поэтому следует различать принципиально неодинаковые виды рельефа поверхности – технологические и эксплуатационные.

Поверхностный слой неоднороден по строению. В общем виде строение поверхностного слоя сплава состоит из следующих характерных участков (см. рис. 2.4).

Граничный слой 1 (слой повышенной твердости) состоит из адсорбированной пленки газов, влаги и смазочно-охлаждающей жидкости, которую можно удалить лишь нагревом детали в вакууме.

Слой 2 – деформированный (наклепанный), сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглерожеными под действием высоких температур при шлифовании участками. В этом слое находятся окислы и нитриды, пустоты, а также надрывы и трещины.

Слой 3 состоит из зерен, сильно деформированных под действием давления (шлифовального круга) и тангенциальных сил при шлифовании. Слой содержит структурно свободный цементит, образовавшийся под действием высоких температур. Имеет увеличенное число дислокаций и вакансии.

Слой 4 – металл с исходной структурой.

При более тонкой обработке (абразивными брусками, лентами и т.д.) слой 1 не изменяется по толщине, а слои 2 и 3 уменьшаются в соответствии с меньшими давлением и температурой поверхности при обработке.

Наклеп металла под выступами неровностей обычно больше, чем под впадинами. Поверхностный слой в зависимости от указанных выше обстоятельств имеет толщину при точении 0,25...2,0 мм, при шлифовании 12...75 мкм, при тонком шлифовании 2...25 мкм, при полировании 2 мкм.

Следует иметь в виду, что шлифовочные прижоги могут достигать глубины 5 мм.

Поверхностный слой может находиться в напряженном состоянии. Остаточные напряжения в нем при механической обработке могут достигать 560...1000 МПа и быть как сжимающими, так и растягивающими (см. рис. 2.3).

Система дефектов – слабых мест поверхности детали – является основной, на которой, начиная с самых малых деформаций, развиваются микротрещины. Вследствие наличия дефектов на поверхности естественно ожидать, что разрушение поверхности при трении будет происходить именно в этих местах, т.е. процесс изнашивания будет носить избирательный характер. По мере изнашивания поверхности слабые места будут возникать вновь.

Стремление получить поверхностный слой с наилучшими эксплуатационными характеристиками привело к применению различных технологических процессов финишной обработки, таких как шлифование, суперфиниширование, полирование, абразивная доводка и др. При этом на строение поверхностного слоя и его геометрические и физические параметры оказывает влияние не только вид технологического процесса окончательной обработки, но и режимы обработки, обуславливающие сложные процессы формирования данного рельефа.

2.7. Физико-химические свойства поверхностного слоя

2.7.1. Поверхностный слой и силы, действующие в его элементах

В обычных условиях, например, после механической обработки, поверхность детали покрыта слоем окисных или гидроокисных пленок, молекулами веществ различной природы, адсорбированных на ней.

Поверхностный слой металла обладает большой активностью, вследствие чего действующие силы адсорбируют на поверхности твердого тела (металла) пленки веществ различной природы.

Силы связи в веществах (металлах) могут быть разделены на пять видов: ионная, ковалентная, металлическая, Ван-дер-ваальсовая, или молекулярная, водородная, или резонансная связь (рис. 2.5).

Ионная связь является химической; в этом случае атомы вещества либо теряют один электрон, либо приобретают его, так что их внешняя электронная оболочка становится заполненной. При этом атомы превращаются в ионы, т.е. приобретают положительный или

отрицательный заряд в зависимости от того, теряет или приобретает электрон данный атом. Атомы с противоположными зарядами взаимно притягиваются. Пример ионной связи атомов в хлористом натрии (см. рис. 2.5, а).

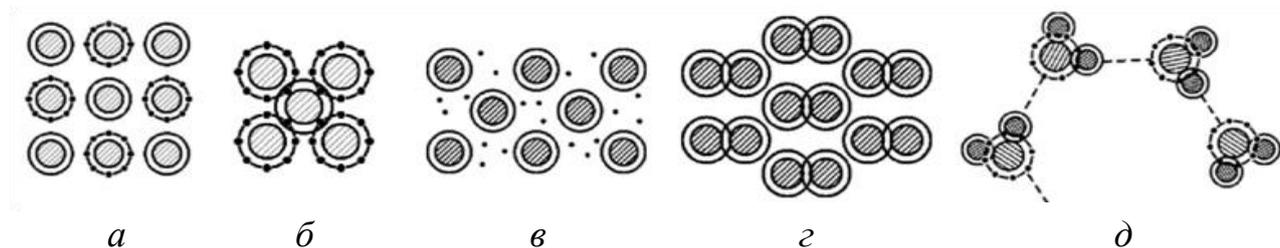


Рис. 2.5. Связи в твердом теле: а – ионная; б – ковалентная; в – металлическая; г – Ван-дер-ваальсовая; д – водородная

Ковалентная связь также является химической. Она возникает в результате того, что электроны, принадлежащие двум разным атомам (группам), становятся общими для обоих атомов (групп). Атомы вступают в ковалентную связь. Примером ковалентной связи может служить связь атомов в алмазе (см. рис. 2.5, б).

При металлической связи все атомы теряют свои валентные электроны и владеют ими сообща, т.е. в металле наблюдается некоторое подобие облака электронов, оторвавшихся от своих атомов. Наличие «свободных» электронов определяет ряд свойств металла и, в частности, их теплопроводность и электропроводность. На рисунке 2.5, в схематично показана металлическая связь в натрии.

Ван-дер-ваальсовая, или молекулярная, связь осуществляется силами, обычно называемыми Ван-дер-ваальсовыми. Это типичная физическая связь. Силы связи возникают здесь в результате некоторого смещения центров электрического заряда электрически нейтральных атомов и молекул. Такое смещение («разбалансировка») вызывает слабое притяжение, которое и связывает атомы или молекулы друг с другом. На рисунке 2.5, г схематично показана Ван-дер-ваальсовая связь между атомами твердого водорода.

Водородная связь относится к группе химических связей. Однако, если обычные типы химических связей – ионная и ковалентная – имеют энергию связи 20...200 ккал/моль, то водородная связь имеет значительно меньшую энергию – от 5 до 8 ккал/моль. Водородная связь осуществляется путем взаимодействия ковалентно связанного

атома водорода с каким-либо атомом, относящимся к той же или другой молекуле и обладающим непоселенной парой электронов. Широко распространенным веществом, имеющим водородную связь, является вода. На рисунке 2.5, д схематично показана водородная связь на примере льда.

Межатомные (или межмолекулярные) силы сцепления, связывающие между собой частицы в кристалле, очень трудно измерить экспериментально, поскольку основные механические характеристики, в том числе пределы упругости и прочности, зависят прежде всего от наличия дефектов в структуре. Очевидно, что тот или иной вид сил связи между частицами вещества (в кристалле) оказывает определенное влияние на величину и характер поверхностных сил.

Вещества, имеющие один какой-либо вид связи, встречаются довольно редко. Как правило, в большинстве случаев наблюдается сочетание различных видов связей, но преобладающий вид связи предопределяет те или иные физические, химические и механические свойства вещества.

2.7.2. Адгезия

Силы связи, действующие в веществах, приводят к адгезии. *Адгезия* (от лат. *adhaesio* – прилипание) – сцепление поверхностей разнородных твердых и (или) жидких тел. Адгезия обусловлена межмолекулярным взаимодействием в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей. Предельный случай адгезии – химическое взаимодействие на поверхности раздела с образованием слоя поверхностного химического соединения.

Частным случаем адгезии является когезия. *Когезия* (от лат. *cohaesus* – связанный, сцепленный) – сцепление молекул (атомов, ионов) физического тела под действием сил притяжения. Это силы межмолекулярного взаимодействия, водородной и (или) химической связи.

При соприкосновении двух тел, например, двух металлических образцов, между соприкасающимися поверхностями возникает адгезия. Однако силы связи между образцами при попытке оторвать один от другого оказываются, как правило, небольшими, даже при наличии однородных материалов.

Следует отметить, что адгезия зависит от двух основных факторов. Первый фактор – величина площади фактического контакта, ко-

торая в сотни и даже тысячи раз меньше геометрической площади контакта. Второй причиной является наличие на поверхности образцов пленок окислов металлов и адсорбированного слоя молекул веществ различной природы. Известно, что поверхности металлических образцов, прогретые в глубоком вакууме с целью удаления слоя адсорбированных молекул, соединяются при соприкосновении гораздо сильнее, чем на воздухе. Если же в глубоком вакууме удалить тем или иным методом не только слой адсорбированных молекул, но и окисный слой, т.е. ввести в соприкосновение ювенильные поверхности, образцы соединятся настолько прочно, что их трудно будет рассоединить. На этом принципе основана сварка трением в глубоком вакууме.

Кроме того, значительная по величине пластическая деформация металлических образцов, вызванная их сдавливанием, также может привести к их полному контакту, а следовательно, к высокому адгезионному соединению. Высокую адгезию можно получить также нанесением жидкости на поверхность твердого тела в условиях полного смачивания. В этом случае после затвердевания образуется предельно прочный адгезионный шов. Примером может служить пайка и горячее лужение металлических поверхностей, образование полимерных покрытий из растворов или расплавов, образование клеевых швов, лакокрасочных покрытий и др.

Таким образом, адгезия является результатом различного рода взаимодействий, т.е. действия сил связи в веществах. Выше были рассмотрены существующие силы связи. Одни из них обладают большой величиной и, следовательно, способны образовать адгезионный шов высокой прочности, другие имеют малое значение и, естественно, адгезионный шов будет слабым. Прочность адгезионного шва зависит не только от сил связи соединяемых веществ, но и от различных факторов, например, присутствия антиадгезионных покрытий (твердых и других смазок).

2.7.3. Поверхностная энергия

Обработанная поверхность в связи с особенностями ее образования отличается большой неоднородностью, как по химической активности, так и по физико-механическим свойствам. Кроме того, в поверхностном слое образуются дефекты (слабые места поверхности детали), которые являются основой развития микротрещин. Разруше-

ние поверхности при трении начинается прежде всего именно в местах дефектов.

Поверхностный слой металла обладает большой активностью. Это обусловлено тем, что внутри твердого тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям и у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. Поэтому в поверхностном слое атомы твердого тела имеют свободные связи, вследствие чего вблизи поверхности создается атомное (молекулярное) притяжение.

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией по сравнению с атомами внутри твердого тела. Избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называют *удельной поверхностной энергией*, или просто *поверхностной энергией*.

Полная энергия кристалла состоит из внутренней и поверхностной энергии. Последняя пропорциональна поверхности раздела фаз, поэтому особенно возрастает при диспергировании твердых тел. Она во многом определяет свойства высокодисперсных систем – коллоидов.

При соприкосновении двух тел поверхностная энергия исчезает и может выделиться в виде теплоты или затратится на подстройку в кристаллической решетке одного кристалла к другому.

2.7.4. Адсорбция и хемосорбция

В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул газа, движущихся к твердой поверхности, или взаимодействия жидкости, соприкасающейся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твердого тела (рис. 2.6).

Явления образования на поверхности твердого тела тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ, либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют *адсорбцией*. В результате уменьшения запаса поверхностной энергии выделяется теплота адсорбции. Процесс, обратный адсорбции, называется десорбцией.

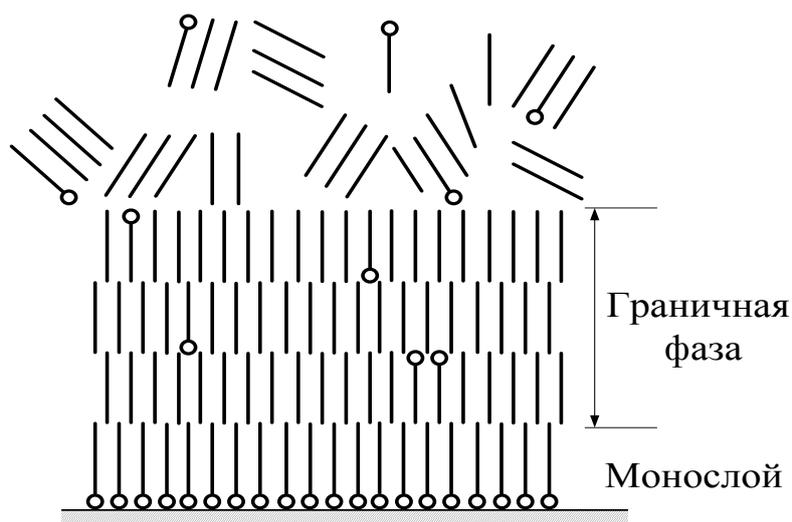


Рис. 2.6. Схема адсорбированного монослоя полярных молекул и ориентации неполярных молекул

Молекулы веществ, адсорбированных на поверхности твердого тела, обладают способностью перемещаться по поверхности из областей, где имеется их избыток, в места, где их недостаточно для полного покрытия поверхности. Подвижность адсорбированных молекул зависит от вида адсорбции. Различают адсорбцию физическую и химическую. Физическая адсорбция связана с притяжением инородных молекул за счет сил Ван-дер-Ваальса. Хемосорбция вызвана действием валентных связей. Поверхность в разных точках имеет разную поверхностную энергию. В отличие от физической адсорбции, химическая носит избирательный характер, она протекает с большой интенсивностью в местах нарушения кристаллической решетки. Во многих случаях физическая и химическая адсорбция протекает одновременно, но одна из них является преобладающей. Так, имеются основания считать, что адсорбция жирных кислот на металлических поверхностях при нормальной температуре носит в основном физический характер, а при повышенной температуре – химический. Силы взаимодействия между молекулами поверхностно-активных веществ и металлической поверхностью различны по природе и зависят как от природы веществ, так и от металла. Микродефекты обладают повышенной адсорбционной активностью.

За счет физической адсорбции на поверхности молекулы газов и воды оседают в первую очередь на активных участках – центрах адсорбции. Сорбированные молекулы вступают в химическую реакцию с материалом. Так протекает окисление поверхностей, вызывающее

коррозию. Образуется окисная пленка. Сорбированная влага и температура стимулируют процесс окисления. Рост окисной пленки сначала происходит быстро, затем замедляется. Пленки различают по толщине: тонкие (толщина до 40 нм), средние (до 500 нм), толстые – видимые (толщиной более 500 нм). Окислы бывают мягкими и рыхлыми, например, у меди, железа и его сплавов (ржавчина). Твердые и сплошные пленки образуются на алюминии, благородных металлах. Свойства окисных пленок обычно существенно отличаются от свойств материала основы. Наиболее важными являются коэффициент теплового расширения, хрупкость, соотношение адгезионной и когезионной прочности. Из-за различия в свойствах пленки могут растрескиваться и отслаиваться, что существенно влияет на изнашивание при трении.

Особое значение имеет физическая адсорбция молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ). Молекулы ПАВ активными группами сорбируются на активных центрах поверхности, образуя молекулярный ворс, который разделяет пару контактирующих поверхностей и существенно снижает трение.

ПАВ, адсорбированные на поверхности твердого тела, способны изменять характер взаимодействия с жидкостью (смачивание). В зависимости от того, как ориентируются молекулы ПАВ по отношению к твердой поверхности, последняя может хорошо смачиваться (гидрофильная) или плохо (гидрофобная поверхность). Так, если молекулярный ворс направлен полярными группами к поверхности, а противоположные концы являются неполярными, то смачивание хорошее, если ориентация молекул противоположная – смачивание плохое. Оценка гидрофильности проводится по величине угла смачивания Θ (рис. 2.7).

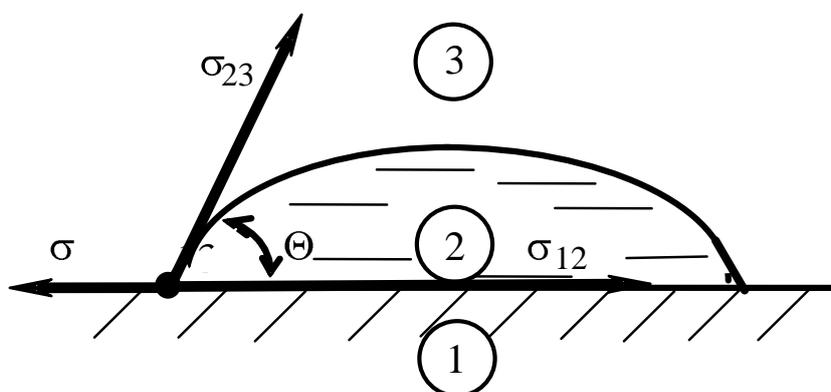


Рис. 2.7. Силы натяжения

При смачивании выполняется условие

$$0 \leq \Theta < \pi / 2, \quad (2.7)$$

при несмачивании

$$\pi / 2 < \Theta \leq \pi. \quad (2.8)$$

Поскольку система стремится сократить запас поверхностной энергии, то тело пытается уменьшить площадь поверхности. Капля жидкости принимает сферическую форму, так как сфера имеет наименьшее отношение площади поверхности к объему. Поэтому поверхность находится в растянутом состоянии, и если из нее выделить элемент, то действие оставшейся части на элемент можно заменить равно распределенными по контуру силами натяжения.

Мерой избыточной поверхностной энергии является коэффициент поверхностного натяжения σ , равный избыточной энергии в расчете на единицу площади поверхности или силе натяжения, действующей на единицу длины контура элемента поверхности.

Под действием этого давления наблюдается капиллярный эффект, заключающийся в подъеме либо опускании уровня жидкости в капилляре на высоту.

Капиллярный эффект имеет большое значение для пористых тел. Он используется для подачи масла в зону трения в подшипниках с пористыми втулками.

Наиболее важными для трибологии физико-механическими показателями поверхностных слоев являются микротвердость H_{μ} , модули Юнга E и сдвига G , предел сдвиговой прочности τ_s . Эти показатели определяют процессы трения и изнашивания.

Для оценки физических свойств поверхностных слоев применяются методы оптической, электронной, ионной микроскопии, рентгеновского спектрального микроанализа, дифракции медленных электронов и рентгеновских лучей с малыми углами скольжения, экзо-электронной эмиссии и др.

2.7.5. Адсорбционный эффект понижения прочности

Поверхностно-активная среда влияет на процессы разрушения и деформации твердых тел, при этом значительно снижается их сопротивляемость деформированию и разрушению в результате физиче-

ской адсорбции ПАВ из окружающей среды. Молекулы ПАВ ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности тела, с которым взаимодействуют (органические кислоты, спирты, смолы, дистиллированная вода). Эти молекулы полярные. Например, если поместить металлическое тело рядом с летучим веществом (например, валерьяновой кислотой), то молекулы кислоты, испаряясь и перемещаясь через воздух, покроют поверхность тела слоем в одну молекулу, причем, если намочить поверхность, то получится многомoleкулярный слой строго ориентированных молекул ПАВ (см. рис. 2.6).

Этот эффект был установлен П.А. Ребиндером и назван его именем. Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты.

Внешний эффект происходит в результате адсорбции ПАВ на внешней поверхности деформированного твердого тела, что вызывает пластифицирование поверхности и снижает предел текучести. Понижается поверхностная энергия, что приводит к облегчению выхода дислокаций. Молекулы органических кислот и спиртов относительно велики, они не могут проникнуть в трещины и вызывают внешний адсорбционный эффект. Эффект Ребиндера можно продемонстрировать на примере продавливания стального шарика через сквозное цилиндрическое отверстие в металлическом образце (рис. 2.8).

При продавливании шарика избыточный поверхностный слой металла пластически деформируется, образуя наплыв перед шариком. При продавливании шарика без смазочного материала в зону деформации вовлекается значительно больше металла, чем в присутствии активной среды.

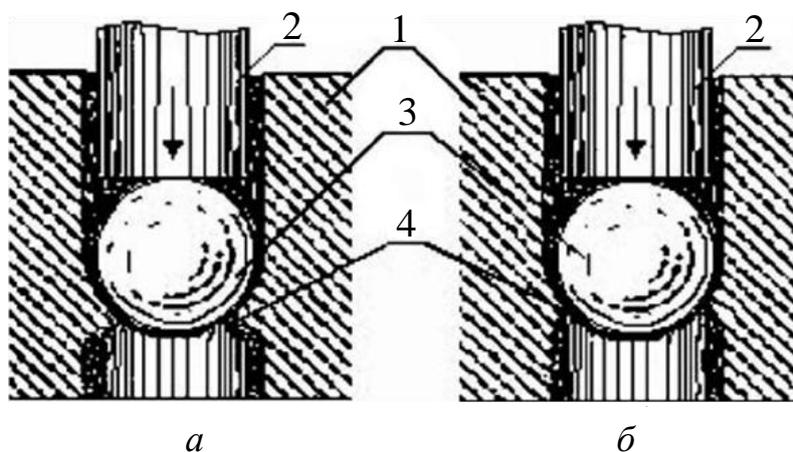


Рис. 2.8. Схема продавливания шарика без смазочного материала (а) и с окисленным парафином (б): 1 – образец; 2 – пуансон; 3 – шарик; 4 – наплыв

Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбцией ПАВ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела. Этот эффект заключается в адсорбции атомов ПАВ на поверхностях микротрещин при деформации разрушения и облегчения их развития в результате снижения работы образования новой поверхности. Давление на стенки трещины у ее вершины может достигать до 10 ГПа.

Эффект Ребиндера проявляется только при совместном действии среды и определенного напряженного состояния. Он может быть вызван не только адсорбцией, но и воздействием жидкости. Наиболее сильно эффект Ребиндера проявляется в условиях образования новых поверхностей, а также при наличии в твердом теле дефектов.

Адсорбционные пленки приводят к эффекту пластификации и снижению предела текучести, т.е. облегчают пластическое течение в зернах, расположенных в поверхностном слое, так как адсорбированный слой понижает поверхностное натяжение металла. Кроме того, попадая в микротрещины, смазка оказывает расклинивающее действие и может снизить прочность твердого тела (рис. 2.9).

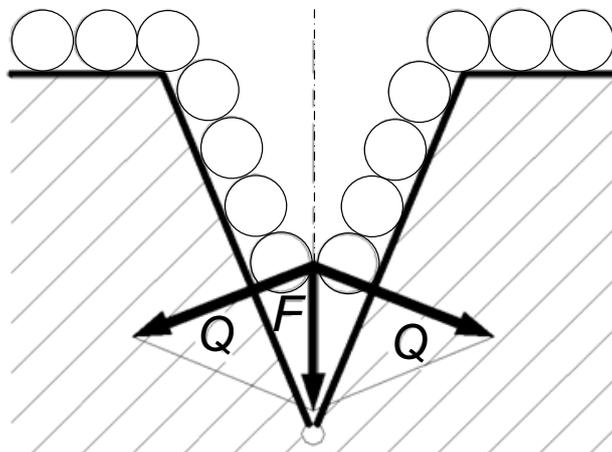


Рис. 2.9. Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала: F – давление адсорбированного слоя; Q – расклинивающие силы

Отличительной особенностью эффекта Ребиндера является то, что он проявляется только при совместном действии среды и определенного напряженного состояния. Речь идет об обратимом участии среды. Это принципиально отличает эффект Ребиндера от химических или электрохимических процессов, коррозии или растворения

твердого тела в окружающей среде. Эффект может быть вызван не только адсорбцией, но и воздействием жидкости.

Наиболее сильно эффект Ребиндера проявляется в условиях образования новых поверхностей, а также при наличии в твердом теле дефектов (в частности границ зерен). Расплавленные легкоплавкие металлы являются сильными поверхностно-активными средами по отношению к более тугоплавким металлам и могут вызвать резкое понижение их прочности. Эффект Ребиндера лежит также в основе облегчения процесса резания металлов под влиянием ПАВ смазочно-охлаждающих жидкостей.

2.7.6. Пленки на металлических поверхностях

Практически все металлы подвергаются окислению. Металлические поверхности в процессе обработки очень быстро покрываются первичной окисной пленкой. Такие пленки обнаруживаются и на благородных металлах. Несмотря на малую толщину, пленка всего в несколько элементарных ячеек кристаллической решетки при нормальной температуре приостанавливает дальнейшее окисление поверхности. Разрушение поверхностей трения в среде воздуха тоже сопровождается их окислением.

Скорость образований оксидной пленки на поверхности металла исчисляется долями секунды. Так, для возникновения слоя толщиной 1,4 нм достаточно 0,05 с. С увеличением толщины рост пленки замедляется. Оксидная пленка находится в напряженном состоянии, испытывая растяжение или сжатие в зависимости от соотношения объемов основного металла образовавшегося на его базе окисла. С увеличением толщины пленки возрастают силы упругости в самой пленке и на границе между пленкой и основным металлом. При некоторой толщине пленки происходит потеря ее устойчивости, наступают мгновенные смещения, и пленка приобретает пористое (рыхлое) строение.

Внешний слой поверхности состоит из загрязнений, попавших на поверхность при обработке, и адсорбированных газов и паров. Толщина этого слоя 0,1...2,5 нм. Расположенный под ним слой, возникающий под влиянием атмосферного кислорода, имеет на железе толщину до 5 нм, на стали примерно до 2 нм, а на алюминии до 15 нм. Толщина граничного смазочного слоя около 20 нм.

Контрольные вопросы к разделу 2

1. Что такое шероховатость? Причины ее появления.
2. Основные параметры шероховатости.
3. Назовите качественные параметры шероховатости.
4. Что такое номинальная площадь контакта?
5. От чего зависит фактическая площадь контакта?
6. Как определяется контурная площадь контакта?
7. Что такое остаточные напряжения? Причины их возникновения.
8. Как влияют пластические деформации на структуру поверхностного слоя?
9. Строение поверхностного слоя.
10. Назовите силы, действующие в поверхностном слое.
11. Дайте определение адгезии и когезии.
12. Что такое поверхностная энергия? Причины ее появления.
13. Что такое адсорбция?
14. В чем заключается эффект Ребиндера?

3. ТРЕНИЕ

3.1. Общие сведения о трении

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 характеризует взаимодействие, происходящее в объеме одного объекта (твердого тела, жидкости или газа). Взаимодействие осуществляется по всей геометрической поверхности выделенного слоя. Скорость, с которой слои вещества движутся относительно друг друга, изменяется непрерывно и достаточно плавно.

При внешнем трении взаимодействие осуществляется в общем случае между различными по строению твердыми телами и имеет двойственную атомно-молекулярную и механическую природу. Это взаимодействие реализуется в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта. Скорость скольжения в зонах фактического контакта изменяется скачком, с чем связаны, например, вибрация автомобиля при включении сцепления, «дергание» при торможении, «визг» тормозов, вибрация резцов при резании и нарушение плавности работы медленно движущихся деталей.

Сходство между внешним и внутренним трением заключается в том, что оба вида трения являются диссипативными процессами.

Отличия внешнего трения от внутреннего состоят в следующем.

1. Различная геометрия взаимодействия трущихся поверхностей. При внешнем трении контакт двух трущихся тел всегда дискретен, т.е. они соприкасаются в отдельных точках. При внутреннем трении поверхность касания непрерывна.

2. При внешнем трении тело перемещается в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости. Внутреннее трение

характеризуется ламинарным перемещением тела в направлении вектора относительной скорости.

3. При внешнем трении возникновение и разрушение связей между трущимися телами локализуется в тонком поверхностном слое, при внутреннем – деформативная зона охватывает весь их объем.

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

Количественной мерой внешнего трения служит *сила внешнего трения* – сила сопротивления относительному скольжению, лежащая в плоскости касания двух твердых тел и являющаяся равнодействующей элементарных сил трения, возникающих в зонах контактов отдельных микронеровностей.

Отношение силы трения к нормальной относительно поверхности трения внешней силе (или нормальной составляющей этой силы) называется *коэффициентом трения*.

3.2. Виды трения

По характеру относительного движения различают трение скольжения и трение качения. В некоторых случаях оба вида трения проявляются совместно, когда качение сопровождается проскальзыванием, например, в зубчатых передачах или между колесами и рельсами.

При трении скольжения относительная скорость всех точек взаимодействующих тел одинакова. При трении качения можно всегда указать точку в зоне контакта, скорость скольжения в которой равна нулю.

В зависимости от того, является ли относительное перемещение соприкасающихся пар макро- или микросмещением, различают силу трения движения, неполную силу трения покоя и наибольшую силу трения покоя. *Сила трения движения* – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленной к общей границе между этими телами. *Наибольшая сила трения покоя* – сила предельного сопротивления относительному перемещению соприкасающихся тел без нарушения связи между ними и при отсутствии смещения в месте контакта. Приложенная к одному из тел параллельно плоскости касания сила, превышающая хотя бы на бесконечно ма-

лую величину силу трения покоя, уже нарушает равновесие. *Неполная сила трения покоя* – сила сопротивления, направленная против усилий сдвига, при отсутствии смещения в месте контакта. Она изменяется от нуля (при отсутствии сил, стремящихся нарушить относительный покой тел в плоскости их касания) до наибольшего значения, когда она переходит в силу трения покоя.

В зависимости от наличия смазочного материала различают: трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

3.2.1. Трение скольжения

Под трением понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому. При этом различают трение покоя, скольжения и качения (рис. 3.1).

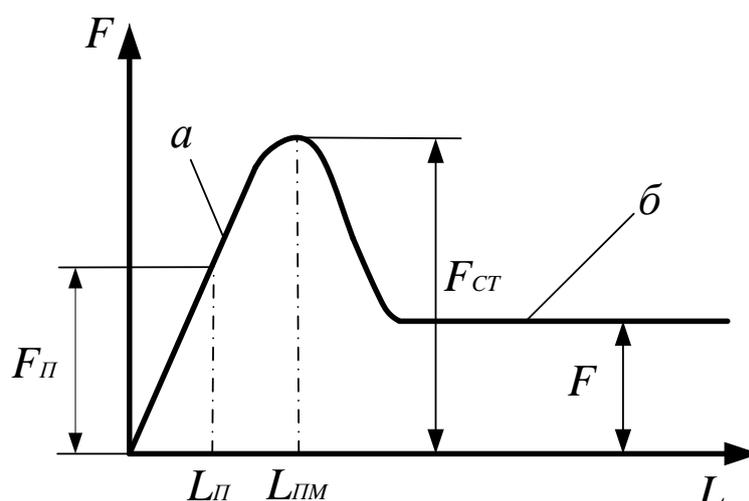


Рис. 3.1. Характерные случаи формирования сил трения:
а – сила трения покоя; б – сила трения скольжения

Силой трения покоя F_n называют сдвигающее усилие, прикладываемое к контактирующим телам и не вызывающее их взаимного скольжения (см. рис. 3.1, а). При этом взаимное перемещение L_n достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется предварительным смещением. Оно носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия.

Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым. На рисунке 3.1 показана предельная величина предва-

рительного смещения $L_{тм}$ и соответственно предельное значение силы трения покоя, которое называют *статической силой трения* $F_{ст}$. Различают коэффициенты трения покоя (статический) и скольжения (кинетический).

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения, в разработку которой внесли большой вклад российские ученые (Дерягин Б.В., Крагельский И.В. и др.) и зарубежные ученые (Боуден, Тейбор, Томлинсон и др.). В соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющей

$$F = F_M + F_D, \quad (3.1)$$

где F_M — молекулярно-адгезионная составляющая силы трения, Н;
 F_D — деформационно-механическая составляющая силы трения, Н.

Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами.

Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому оттеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контактирующие поверхности (рис. 3.2).

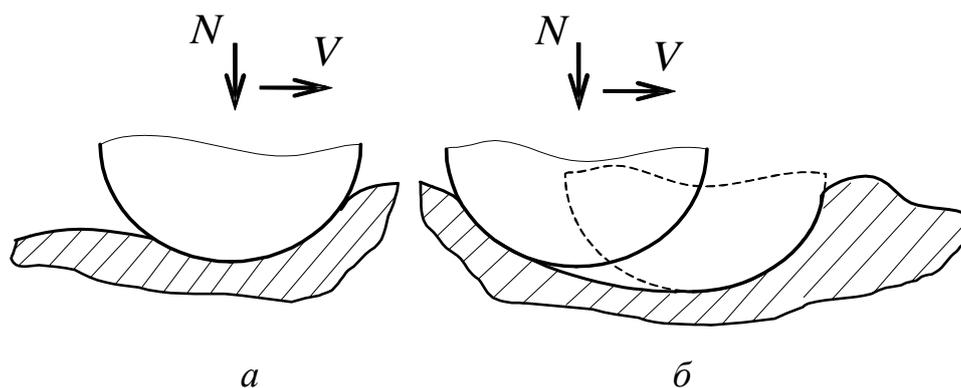


Рис. 3.2. Упругое (а) и пластическое (б) оттеснение материала при скольжении

На рисунке 3.2, а показано скольжение жесткого сферического индентора по вязкоупругому полупространству. Материал после прохода выступа из-за запаздывания деформации по отношению к на-

грузке не успевают восстанавливать форму. Поэтому выступы перед индентором и после несимметричны, а реакция опоры, приложенная в центре контактной поверхности, не совпадает по направлению с нормальным усилием. Это явление характеризуется гистерезисом деформации.

На рисунке 3.3 показана кривая гистерезиса при растяжении-сжатии вязкоупругого стержня. Кривая OM отражает процесс нагружения, а кривая MN – процесс разгрузки. Из-за запаздывания деформации в тот момент, когда напряжение равно нулю, деформация не исчезает и равна ε_0 . Поэтому след, оставшийся при движении выступа, не успевает восстанавливаться полностью, чего следовало бы ожидать для идеальной упругой среды.

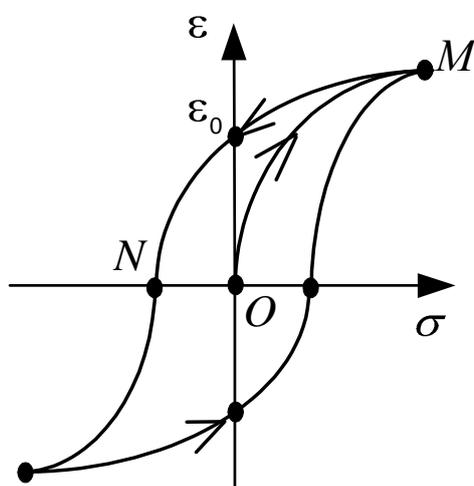


Рис. 3.3. Гистерезис

На рисунке 3.2,б показано поведение жесткого выступа при скольжении по пластической среде. Вначале, пока скольжение отсутствует, под действием нормального усилия выступ заглубляется. При скольжении задняя граница выступа отрывается от лунки. Впереди возникает валик оттесняемого материала. Коэффициент трения определяется по зависимости (1.4).

Многочисленные исследования показали, что для металлов деформационная составляющая коэффициента трения примерно в 100 раз меньше, чем адгезионная. Поэтому коэффициент трения в первом приближении равен адгезионной составляющей.

На коэффициент трения скольжения оказывают влияние:

1. Внешняя нагрузка N . С ростом N f_M уменьшается, f_D увеличивается, т.е. молекулы отталкиваются у разнородных материалов, у однородных притягиваются.

2. Шероховатость поверхности. При выборе оптимальной шероховатости необходимо принимать во внимание величину площади контакта, условия эксплуатации и тип смазочного материала. При увеличении величины шероховатости f_M уменьшается, f_D увеличивается.

3. Твердость трущихся тел. Увеличение твердости приводит к росту коэффициента трения.

4. Температура контактирующего тела. С ростом температур наблюдается возрастание коэффициента трения, при этом f_M уменьшается; f_D увеличивается (сваривание).

5. Скорость скольжения. Ее увеличение приводит к снижению коэффициента трения скольжения.

В таблице 3.1 приведены значения коэффициентов трения скольжения для различных сочетаний материалов.

Таблица 3.1

Коэффициенты трения скольжения

Пары качения	Коэффициент трения f
Тазобедренный сустав	0,008
Подшипник скольжения	0,02–0,08
Сталь-бронза	0,15
Сталь-абразивный круг	0,9

Для измерения силы трения применяют различные трибометры. Они позволяют исследовать влияние на трение шероховатости поверхностей, материалов пары трения, нормальной нагрузки, скорости скольжения, температуры, смазки и многих других факторов.

3.2.2. Трение качения

Сила трения качения по крайней мере в 10 раз меньше силы трения скольжения. Силы трения качения объясняли различными теориями. Ранее считалось, что трение качения сопровождается

скольжением сопряженных поверхностей. Позднее было установлено, что скольжение оказывает влияние на силу трения качения.

Трение качения представляет собой сопротивление качению, причиной которого, по упрощенной схеме, является деформация тел в месте их контакта. Если в контакте отсутствуют пластические деформации, то тогда трение обусловлено гистерезисными потерями в твердом теле.

Взаимное проскальзывание поверхностей можно представить при рассмотрении качения шарика (рис. 3.4).

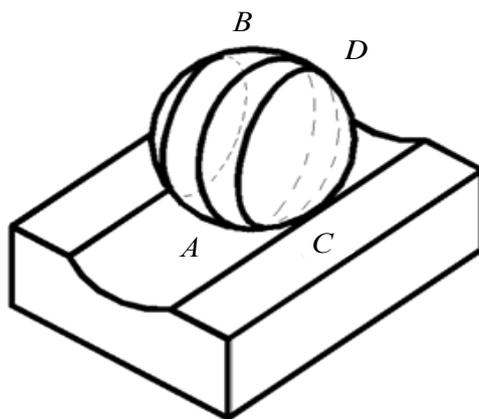


Рис. 3.4. Шарик, катящийся по канавке

Окружность AB шарика перемещается посередине канавки, а окружность CD касается ее края. Как видно из рисунка, окружность AB проходит за один оборот шарика большее расстояние, чем окружность CD . Эта разница обуславливает скольжение поверхностей трения.

На поверхностях тел качения возникают силы сцепления. Адгезионное сцепление незначительно влияет на силы трения качения, но оказывает большую роль при изнашивании тел качения.

При трении качения, в случае твердых тел, деформации поверхностей незначительны, поэтому окисные пленки на поверхностях трения не подвергаются значительным разрушениям. Вследствие чего скольжение поверхностей происходит не по металлу, а по пленкам, которые могут изнашиваться. Это объясняет влияние скольжения на износ тел качения.

По экспериментальным данным, сила трения качения для приработанного состояния поверхностей находится по зависимости

$$F = k \cdot N_{\text{ш}}^n / D^m, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент трения качения, зависящий от материала;
 $N_{\text{ш}}$ – нагрузка на шарик, Н;

D – диаметр шарика, мм;

$n = 1,7 \dots 1,85$;

$m = 1,5 \dots 1,6$.

На силу трения оказывают влияние: вязкость смазочного материала, размер тел качения, трение в сепараторах, шероховатость поверхностей и др.

Сила трения в подшипниках качения увеличивается при технологических и монтажных погрешностях, высоких скоростях и при трении в уплотнениях. Значение коэффициента трения в подшипниках различных типов составляет $0,001 \dots 0,01$.

Момент трения в подшипниках качения

$$M = 0,5 f_Q Q d \text{ или } M = 0,5 f_T T d, \quad (3.3)$$

где f_Q – коэффициенты трения при радиальной нагрузке;

f_T – коэффициенты трения при осевой нагрузке;

d – диаметр вала, мм;

Q – радиальная нагрузка, Н;

T – осевая нагрузка, Н.

Некоторые ориентировочные значения коэффициентов трения качения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициенты трения качения

Пары качения	Величина коэффициента трения f
Стальной шарик-сталь	0,001
Чугун-чугун	0,005
Пневматическая шина-асфальт	0,02
Стальное колесо-рельс	0,05

3.2.3. Сухое трение

При исследовании явления трения между двумя твердыми телами можно выделить три основных вида трения: сухое (трение без смазочного материала), граничное и жидкостное.

Трение без смазочного материала возникает при отсутствии на поверхностях трения тел специально введенного смазочного материала. Этот вид трения можно наблюдать в тормозах, фрикционных

передачах, в узлах машин текстильной, пищевой, химической промышленности, а также в узлах машин, работающих при высоких температурах. Применение смазочного материала в подобных узлах недопустимо по соображениям безопасности, а также когда смазочный материал просто не пригоден.

При трении без смазки дополнительная энергия тратится на преодоление:

- взаимного механического зацепления неровностей (шероховатостей) трущихся поверхностей при их относительном перемещении;
- сил межмолекулярного притяжения;
- явления сваривания отдельных острых выступов поверхностей трущихся пар.

Трение имеет молекулярно-механическую природу. Так молекулярные силы, действующие на фактических площадках контакта, вызывают адгезию, приводят к схватыванию поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания.

Сила трения F обусловлена механическим и молекулярным взаимодействием:

$$F = aA_r + bN, \quad (3.4)$$

где a – средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения;

A_r – фактическая площадь контакта, мм²;

b – коэффициент характеризующий механическую составляющую силы трения;

N – внешняя нагрузка, Н.

Тогда коэффициент силы трения F

$$f = aA_r/N + b. \quad f = (aA_r/N) + b. \quad (3.5)$$

Механическая составляющая выражается в виде пластической деформации поверхностей. Величина этой составляющей обычно весьма незначительна.

Процесс трения без смазочного материала сопровождается скачкообразным скольжением поверхностей, что проявляется, например, в виде вибрации автомобиля при включении сцепления, «скрипа» тормозов, вибрации резцов при резании и т.д. Избежать подобных скачков можно, увеличив жесткость системы, а также повысив скорость скольжения.

При трении металлических поверхностей при высоких температурах (выше температуры разложения минеральных масел и твердых смазочных материалов) образуется окисная пленка. Свойства этой пленки зависят от состава поверхностей. Пленка способствует снижению сил трения и интенсивности изнашивания, а также предохраняет поверхности от коррозии.

3.2.4. Граничное трение

Граничное трение возникает на поверхности сопряженных тел при толщине смазочного слоя менее 0,1 мкм. В этом случае сила трения зависит от природы и состояния трущихся поверхностей. Наличие граничного слоя (граничной пленки) способствует снижению силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2...10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз. Коэффициент граничного трения находится в пределах 0,08...0,15. Само же граничное трение неустойчиво и определяет предел работоспособности сборочной единицы.

Масла способны адсорбироваться на металлической поверхности, образуя граничную пленку. На прочность пленки влияет наличие в ней активных молекул, их качества и количества. Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности (рис. 3.5, а), граничную пленку в этом случае можно представить в виде ворса. Когда происходит взаимное перемещение поверхностей трения, молекулы как бы изгибаются в противоположные стороны. На восстановление ориентации молекул в начальное положение требуется некоторый промежуток времени.

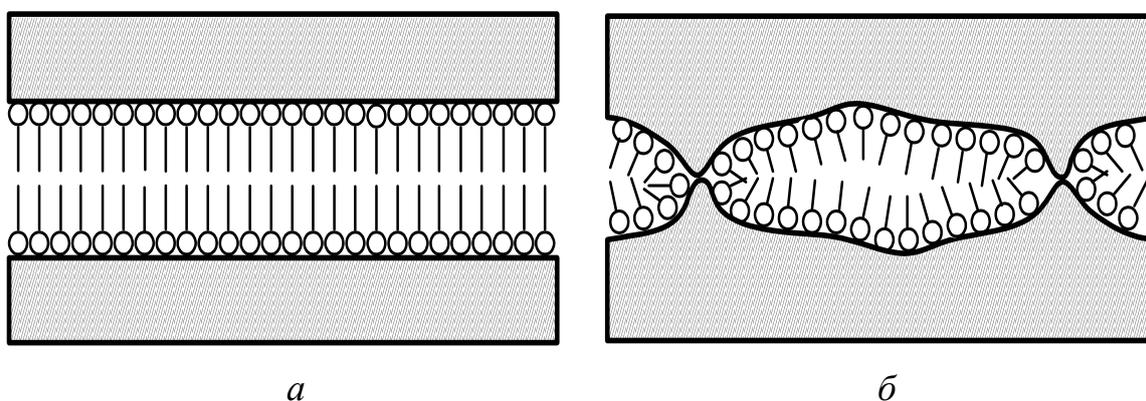


Рис. 3.5. Схема контакта тел при граничной смазке: а – контакт идеальных поверхностей; б – контакт реальных поверхностей

Механизм трения при граничной смазке можно представить в следующем виде. В контакте под нагрузкой протекает упругая и пластическая деформация. На площадках контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без разрушения граничной пленки.

Если пластические деформации значительны, то на площадках контакта с высокими местными температурами может произойти разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии поверхностей и схватыванием металлов на микроучастках (рис. 3.5, б). Это вызывает дополнительное сопротивление движению.

Смазочная пленка имеет способность восстанавливаться при местных повреждениях. Это происходит за счет адсорбции, протекающей с большой скоростью, благодаря подвижности молекул смазочного материала. Окисление пленки способствует ее разрушению.

На процесс граничного трения влияют различные факторы. Так, добавление ПАВ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа. Большое влияние на эффективность смазочного действия оказывает химическое взаимодействие металла и смазочного материала. Например, жирные кислоты, вступая в реакцию с поверхностью металла, образуют мыла, способные без разрушения выдерживать значительные деформации.

При граничной смазке важное значение имеют специальные добавки – присадки, содержащие органические соединения серы, фосфора, хлора или их сочетание. Присадки позволяют искусственно повысить химическую активность граничной пленки. Такие присадки, как мышьяк и сурьма в условиях высоких температур образуют пленки сульфида железа, фосфита или фосфата железа. Образовавшиеся пленки предотвращают металлический контакт, понижают сопротивление трению, препятствуют дальнейшему локальному повышению температуры. Кроме того, при определенных условиях пленки ведут себя как твердый смазочный материал.

3.2.5. Жидкостное трение

Режим *жидкостного трения* проявляется, когда трущиеся поверхности разделены слоем жидкого смазочного материала, находящегося под давлением, и непосредственный контакт элементов пары отсутствует. Слой смазочного материала называют несущим слоем. Давление в этом слое, уравнивающее внешнюю нагрузку, возникает в результате относительного движения, либо под действием

внешнего давления. Толщина слоя во много раз превышает толщину граничной пленки и суммарную шероховатость обеих поверхностей.

Принято, что для полного отделения неровностей поверхностей толщина слоя должна в пять раз превышать сумму шероховатостей вала и втулки. Применяемые смазочные материалы не позволяют получить толщину слоя большую $h=100 (Ra_1+Ra_2)$, где Ra_1 и Ra_2 – параметры шероховатостей вала и втулки соответственно. Вследствие этого жидкостная смазка ограничена диапазоном $5 \leq h \leq 100$.

Трение в этом случае сводится к вязкостному сопротивлению в самом слое смазки, обусловленному сдвигом соседних слоев пленки, т.е. к внутреннему трению. Пока такая жидкая пленка сохраняет целостность, материал движущихся поверхностей и их шероховатость не имеют значения. От жидкой пленки требуется, чтобы она прилипла к движущимся поверхностям, т.е. чтобы не было проскальзывания смазки относительно поверхностей.

Жидкостному режиму трения характерен малый коэффициент трения (0,003...0,05), что в 50...100 раз меньше, чем при трении без смазочного материала. Этот режим трения обеспечивает резкое уменьшение износа и нагрева деталей, сокращение потерь энергии на трение, а также повышает надежность и долговечность в работе.

С увеличением вязкости смазочного материала и скорости движения трущихся поверхностей жидкостное трение возрастает. Увеличение толщины слоя смазочного материала понижает силу трения. Кроме того, сила трения при жидкостной смазке не зависит от природы сопрягаемых поверхностей.

Явление трения при жидкостной смазке было открыто в 1883 г. русским ученым Н.П. Петровым. Он установил, что поведение смазочного вещества в слое при взаимно перемещающихся рабочих поверхностях в условиях жидкостного трения подчиняется законам гидродинамики.

Жидкостное трение может быть обеспечено двумя методами – гидродинамическим или гидростатическим (при подаче смазки под давлением).

При гидродинамическом способе масло увлекается вращающимся валом в зазор между валом и подшипником (рис. 3.6).

Зазор имеет клиновидную форму, и слой смазки получает возможность воспринимать нагрузку тем более значительную, чем больше число оборотов вала.

Другим способом, обеспечивающим жидкостное трение, является создание гидростатического давления в несущем слое, способное разделять поверхности. Утечка масла через торцы подшипника компенсируется подачей насоса.

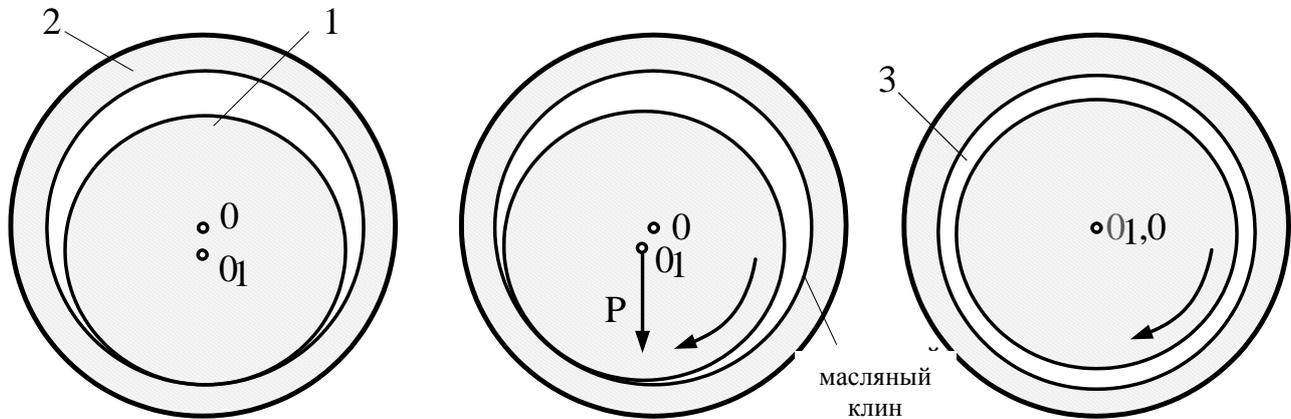


Рис. 3.6. Схема образования несущей способности масляного слоя опорного подшипника: 1 – шейка вала (вращается); 2 – втулка подшипника (неподвижна); 3 – клиновое пространство; P – нагрузка; O и O_1 – центры сечений втулки подшипника и шейки вала

В соответствии со способами создания давления в несущем слое различают гидродинамические и гидростатические опоры скольжения. Большее распространение получили гидродинамические опоры, поэтому в обиходе под жидкостной смазкой понимают гидродинамические опоры.

Для любых пар трущихся поверхностей вязкость масла должна быть наименьшей, но в то же время обеспечивающей жидкостное трение. Так, для подшипника скольжения коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания кинематическая вязкость должна быть не менее $4...5 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Клиновой зазор в гидродинамической опоре является неотъемлемым условием поддержания режима трения при жидкостной смазке. В плоских опорах клиновой зазор создается конструктивно, с помощью скосов поверхности. В наиболее узкой части клинового зазора образуется масляный клин. С увеличением скорости вращения вала клин становится мощнее, вал отжимается, что способствует увеличению зазора и заполнению его смазочным материалом.

При уменьшении скорости вращения вала или при утечках смазочного материала давление в масляном клине падает, вал начинает

садиться, а жидкостное трение переходит сначала в полужидкостное, а затем и в граничное.

Важными условиями получения жидкостного трения являются: выбор смазочного материала с учетом температуры, при которой происходит жидкостное трение; конструктивные формы трущихся поверхностей узлов трения, обуславливающие образование надлежащего слоя смазки; способ подвода смазочного материала – количество и равномерность подаваемой смазки.

3.2.6. Смешанное трение

Режим смешанного (полужидкостного) трения имеет место при наличии в контакте жидкостной и граничной смазки. Такое трение возникает при пусках и остановках, высоких температурах и нагрузках, недостаточной вязкости масла и его подаче, а также при попадании в масло абразивных механических примесей.

В этих ситуациях масла в зазоре между трущимися парами может оказаться недостаточно для обеспечения жидкостного трения, масляный слой частично разрушен, в результате чего в отдельных местах соприкосновения трущихся поверхностей возникает граничное или сухое трение. Если масло обладает высокой смазывающей способностью, только это и позволяет максимально уменьшить трение и износ, а также предотвратить заклинивание трущихся деталей.

Нормальная нагрузка при смешанном трении уравнивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей на площадках их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Сила трения складывается из касательной составляющей сил взаимодействия поверхностей и сопротивления вязкому сдвигу.

Гидродинамическое действие жидкости может возникнуть в двух случаях.

В первом случае оказывает влияние макрогеометрия соприкасающихся поверхностей, образуется сужающийся зазор и при подаче масла в достаточном количестве возникает поток и образуется подъемная сила. Поток жидкости обтекает участки взаимного контакта поверхностей.

Во втором случае гидродинамическое действие возникает, если неровности между площадками контакта образуют в направлении относительного перемещения деталей места сужения и расширения по

высоте. При достаточном количестве масла между поверхностями оно играет роль гидродинамических микроклиньев (рис. 3.7).

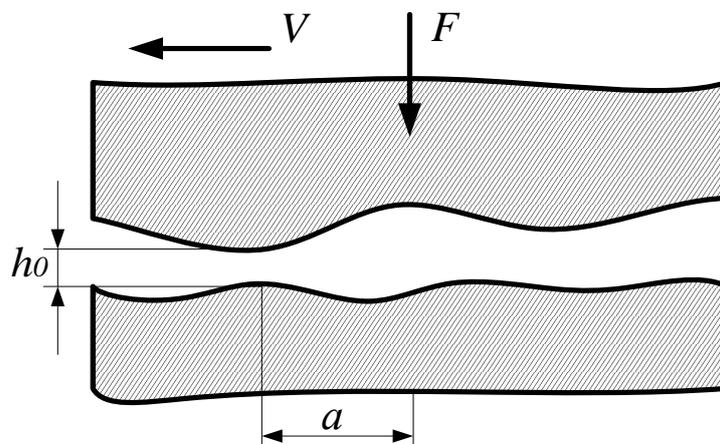


Рис. 3.7. Схема элементарного гидродинамического клина, образованного неровностями трущихся поверхностей: a – длина масляного клина; h – начальный зазор между поверхностями в вершине клина

Гидродинамическое действие масла на микроклиньях проявляется при малых скоростях скольжения.

3.2.7. Диаграмма Герси-Штрибека

Режимы трения удобно рассматривать с помощью диаграммы Герси-Штрибека (рис. 3.8). На этой диаграмме отображена связь коэффициента трения с характеристиками режима смазки сопряжения $\eta V/p$. К таким характеристикам относятся вязкость, скорость и нагрузка.

С помощью этой диаграммы можно оценить условия перехода одного режима в другой. На диаграмме линия $a-a$, проходящая через точку минимума коэффициента трения, разделяет области трения при жидкостной и других видах смазки. Условие перехода одного режима трения в другой рассмотрим на примере работы подшипника скольжения. Допустим, подшипник работает в режиме граничного трения и по какой-то причине повышается давление. Вследствие этого значение $\eta V/p$ будет снижаться, и начальная точка переместится в левую верхнюю часть диаграммы. Сила p возрастет, температура в зоне контактирования повысится, а вязкость смазочного материала понизится. Повышение нагрузки приводит к повышению температуры и частичному разрушению граничной пленки. Линия $b-b$ отделяет область трения при граничной смазке от области трения сухих поверхностей.

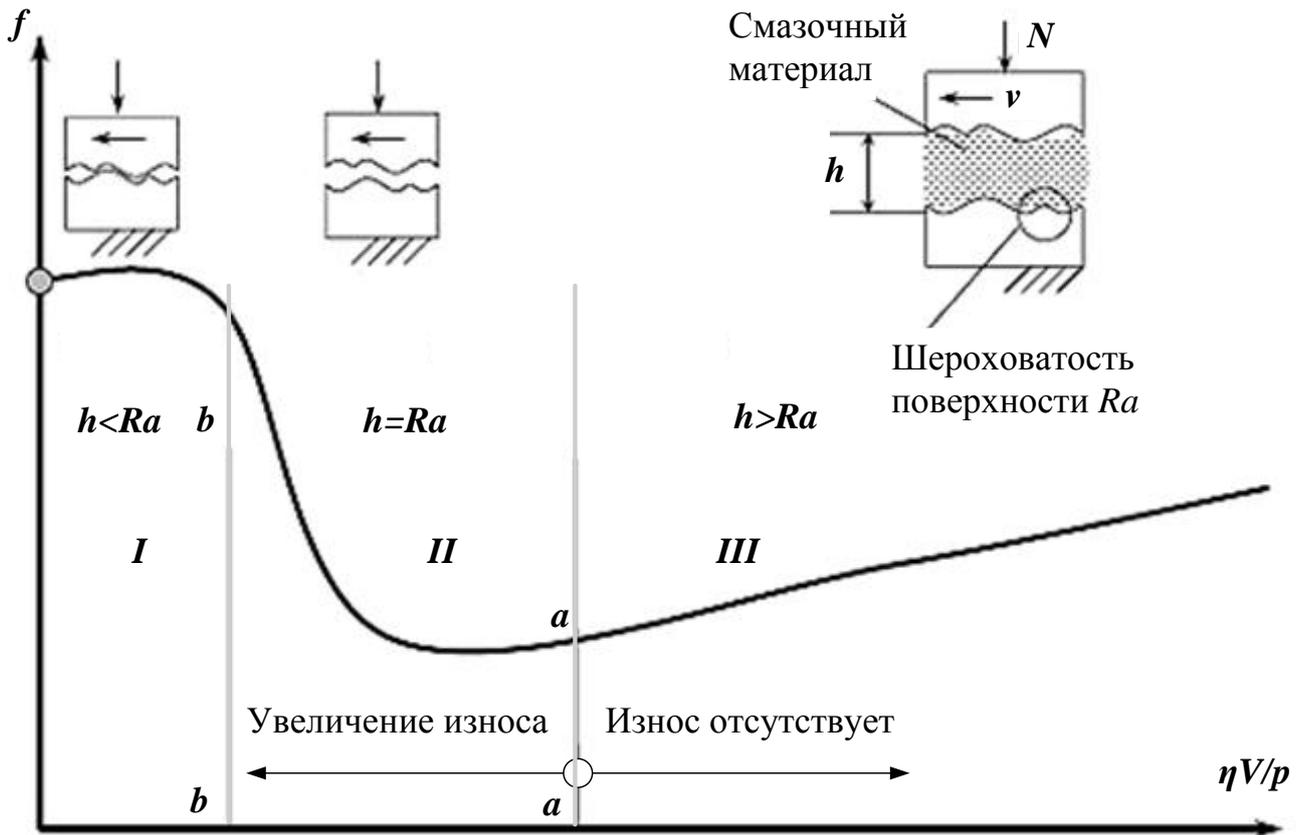


Рис. 3.8. Диаграмма Герси-Штрибека:

I – граничный режим трения;

II – смешанный режим трения;

III – жидкостный режим трения;

η – вязкость;

V – скорость; p – нагрузка

Если режим трения расположен в зоне *III*, то в узком интервале изменения $\eta V/p$ сила трения стабильна.

Характеристика $\eta V/p$ справедлива для полужидкостного и жидкостного режима трения. Для других видов трения вязкостные свойства смазочного материала можно не принимать во внимание. Изменение коэффициента трения при малых значениях (близких к нулю) характеристики $\eta V/p$, кривая от точки, соответствующей коэффициенту трения покоя, может монотонно убывать или возрастать. Пройдя через максимум, она будет снижаться вплоть до критического режима, которому соответствует минимальный коэффициент трения.

Контрольные вопросы к разделу 3

1. Причины возникновения трения.
2. Проявление внешнего и внутреннего трения.
3. Что служит количественной мерой внешнего трения?
4. Виды трения в зависимости от характера относительного движения.
5. Что оказывает влияние на коэффициент трения скольжения?
6. Затраты энергии при трении без смазочного материала.
7. Что оказывает влияние на процесс граничного трения?
8. Какими методами можно обеспечить жидкостное трение?
9. Когда проявляется смешанное трение?
10. Назначение диаграммы Герси-Штрибека. Характерные области этой диаграммы.

4. ИЗНАШИВАНИЕ ПАР ТРЕНИЯ

4.1. Основные характеристики изнашивания

Относительные перемещения контактирующих поверхностей и их механические взаимодействия приводят не только к изменениям состояния и свойств материалов поверхностных слоев, но и к их разрушению.

Обычно разрушение происходит в форме отделения от поверхностей трения мелких частиц материала, что приводит с течением времени к изменению размеров и формы контактирующих деталей. Это явление называют изнашиванием. Изнашивание является сложным многоуровневым процессом.

Как отмечалось ранее, основные понятия, термины и определения в области изнашивания регламентированы ГОСТ 27674-88. В частности, по этому ГОСТу результат *изнашивания* определен термином *износ*. Величину износа определяют в единицах длины, объема, массы.

Износ деталей и узлов трения приводит к ухудшению функциональных показателей машины. В результате износа нарушается кинематическая точность механизмов, снижаются производительность и коэффициент полезного действия, уменьшается прочность деталей, увеличиваются расходы на ремонт и обслуживание, увеличиваются шум и вибрация.

Количественно изнашивание характеризуется скоростью изнашивания

$$\gamma = \Delta h / t, \quad (4.1)$$

где Δh – величина износа, или толщина удаленного слоя, м;
 t – время, ч.

Широко распространена другая характеристика изнашивания – интенсивность изнашивания:

$$I = \Delta h / L, \quad (4.2)$$

где Δh – величина износа, м;
 L – путь трения, м.

Различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени).

Еще одной характеристикой изнашивания является *износостойкость* – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях. Оценивается величиной обратной скорости, или интенсивности изнашивания.

Значение износостойкости находится в пределах $10^3 \dots 10^{13}$. Установлено десять классов износостойкости (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Классы износостойкости

Класс	Износостойкость	Класс	Износостойкость
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$
Износостойкость типовых трибосопряжений			
Цилиндро-поршневая группа автомобиля		12...11 класс	
Дисковый тормоз		10...6 класс	
Подшипники скольжения		8...5 класс	
Резцы		8 класс	

4.2. Предельный и допустимый износ

Поскольку изнашивание в процессе эксплуатации машины неизбежно, очень важно определять степень износа детали и установить необходимость ее ремонта. Известно, что первоначальный износ появляется в период приработки двух деталей. Этот износ незначителен и зависит от зазоров и шероховатости поверхностей. В дальнейшем нарастание износа происходит за длительный период эксплуатации и, наконец, износ достигает величины, когда наступает значительное нарушение сопряжения деталей. Поэтому в технике приняты понятия о допустимом и предельном износе.

Допустимым износом называется износ, при котором изделие сохраняет свою работоспособность.

Предельный износ соответствует предельному состоянию изнашивающейся детали.

Установление предельных износов необходимо для выполнения регулировочных операций и выбраковки деталей в эксплуатации и при ремонте. Для определения предельных износов следует руково-

дствоваться тремя критериями: техническим, функциональным и экономическим.

Согласно техническому критерию, предельному значению износа соответствует:

- резкое возрастание интенсивности изнашивания;
- снижение прочности изнашиваемой детали вследствие изменения ее размеров;
- усиление влияния износа рабочего органа или деталей сопряжения на работоспособность других деталей;
- самовыключение механизма при работе.

Технический признак предельного износа можно использовать также для оценки изменения характера неподвижного сопряжения (соединения с натягом, шлицевое и шпоночное соединения) вследствие контактной коррозии, релаксации напряжений и макропластической деформации деталей.

Основанием для функционального критерия служит изменение по мере изнашивания качества функций, выполняемых узлом или машиной. Например, отклонения размеров профиля проката от номинального вследствие износа валков, погрешности формы обработанного на металлорежущем станке изделия, изменение подачи компрессора при заданном давлении на выходе.

Экономические показатели работы машины положены в основу третьего критерия предельного износа. Наименьшие затраты на единицу выработки при сохранении качества в заданных пределах являются экономическим критерием оптимального срока службы, межремонтного периода рабочего органа или узла машины.

Экономический критерий является наиболее общим. Технические и функциональные признаки являются основными в тех случаях, когда можно не считаться с рентабельностью работы машины.

Срок службы детали или узла определяется не только по предельным износам, в соответствии с критериями, но и другими факторами: контактная усталость, коррозия и др.

Срок службы пары или детали определяют по формуле

$$t = \frac{U_{max} - U_0}{v}, \quad (4.3)$$

где U_{max} – предельный износ, м;

U_0 – начальный износ (прирабочный износ), м;

v – скорость изнашивания, м/ч.

Для расчета необходимо установить предельный износ и знать скорость изнашивания.

4.3. Механизм изнашивания

Рассматривая механизм изнашивания, можно выделить три явления, происходящие в зоне контакта пары трения:

- взаимодействие поверхностей трения;
- изменения в поверхностном слое;
- разрушение поверхностного слоя.

Все эти явления наступают не поэтапно, они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей происходит как на механическом, так и на молекулярном уровне. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении и зацеплении неровностей поверхностей.

Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Адгезия не только обуславливает необходимость приложения касательной силы для относительного сдвига поверхностей, но и может привести к вырыванию материала. Схватывание характерно только металлическим поверхностям. В отличие от адгезии, схватывание обладает более прочными молекулярными связями. Разрушение масляной пленки способствует схватыванию поверхностей трения.

Изменения на поверхностях трения обусловлены пластической деформацией, повышением температуры и химическим действием окружающей среды.

Деформация приводит к следующим изменениям:

1. Многократные упругие деформации приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения.

2. Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя и, как заключительный этап, приводит к его разрушению.

3. Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу поверхностного слоя — его упрочнению. Микротвердость достигает максимума на некоторой глубине, далее уменьшаясь до исходной.

4. Деформирование поверхностей приводит к интенсивному изнашиванию мягкой основы поверхностного слоя.

Влияние повышения температуры состоит в следующем:

1. Увеличение температуры поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла приводит к тому, что поверхностный слой не упрочняется, а находится в состоянии повышенной пластичности.

2. Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам, обогащению поверхности некоторыми элементами. Например, сталь обогащается углеродом.

3. Интенсивное локальное нагревание и последующее резкое охлаждение поверхности могут приводить к образованию закалочных структур.

4. Высокие температуры вызывают напряжения в материале, влияющие на его разрыхление.

5. Исследование контакта на микроуровне при высоких температурах показало возможность образования магмы-плазмы.

Химическое действие среды заключается в следующем:

1. При изнашивании на поверхностях образуется окисная пленка, предохраняющая их от схватывания и глубинного вырывания.

2. В результате взаимодействия поверхности с химически активными присадками образуется защитная пленка. Она эффективно защищает поверхность от изнашивания при условии, что скорость образования пленки превышает скорость изнашивания.

3. Разложение смазочного материала при высоких температурах может приводить к насыщению поверхности углеродом.

4. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание.

4.4. Стадии изнашивания пар трения

Изменение размеров деталей при изнашивании происходит неравномерно по поверхности трения и непостоянно во времени. Изменение износа от времени характеризуется кривой изнашивания (рис. 4.1, *a*).

Скорость изнашивания в каждый момент времени оценивается углом наклона кривой изнашивания (1) – это тангенс угла α . Кривая изменения скорости изнашивания от времени показана на рисунке 4.1, *a* в виде кривой (2).

На кривой изнашивания можно выделить следующие участки: *I* – приработки; *II* – установившегося изнашивания; *III* – форсированного изнашивания.

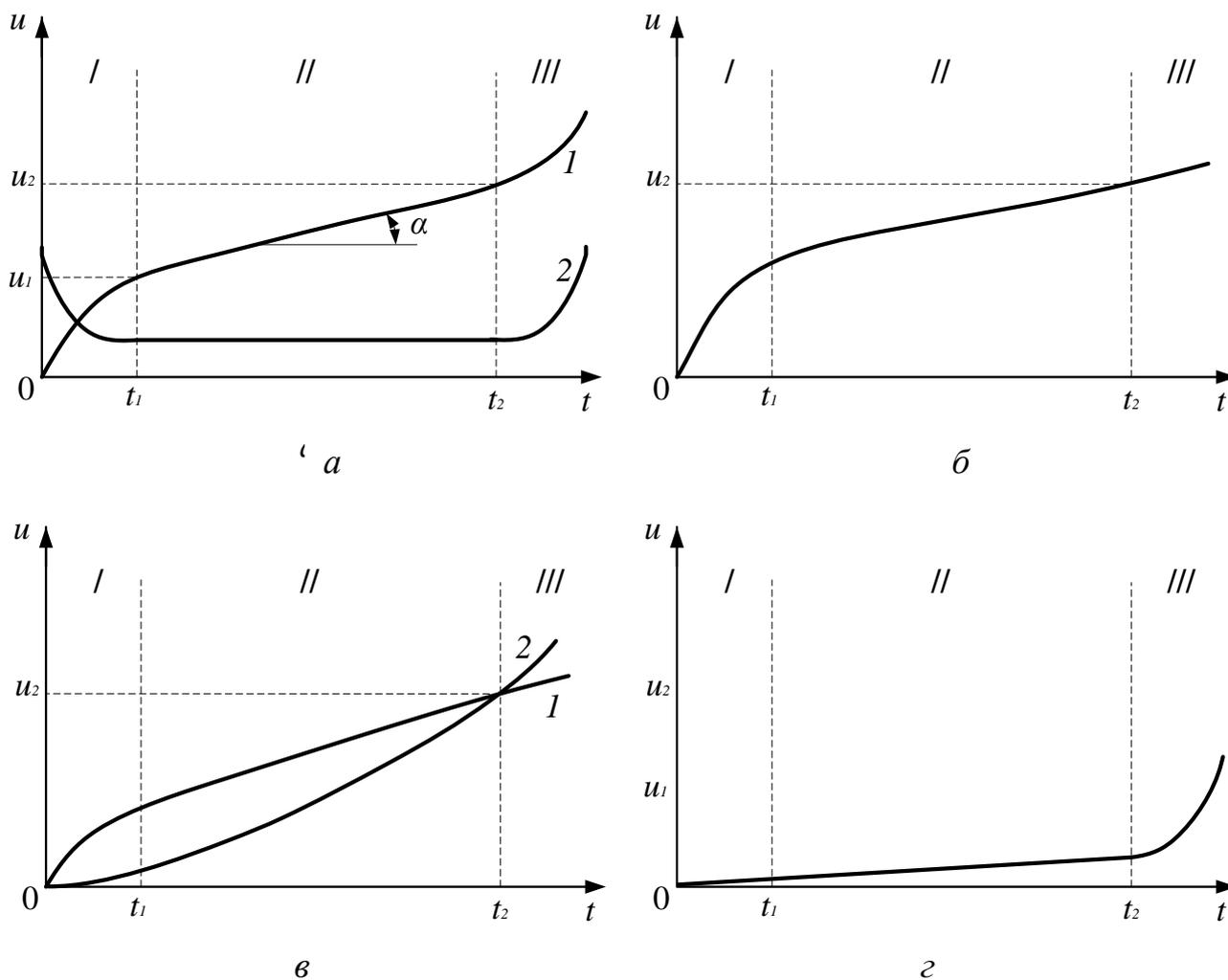


Рис. 4.1. Кривые изнашивания поверхностей трения

На стадии *I* осуществляется процесс приработки, т.е. процесс изменения геометрии поверхности трения и физико-химических свойств материала. В процессе приработки (характерна высокая скорость изнашивания) устанавливается определенная для данной системы шероховатость, не зависящая от первоначальной шероховатости, полученной в результате технологической обработки, а зависящая от трущихся тел и смазочного материала, а также от условий изнашивания (нагрузки, скорости, температуры, условий смазывания и т.д.).

После завершения образования равновесной шероховатости и оптимальных для данного соединения структур поверхностных слоев трущихся тел начинается процесс установившегося изнашивания (стадия *II*). При этом интенсивность изнашивания постоянна и достаточно невелика. Постепенное накопление износа через определенный период приводит к значительному изменению размеров и формы деталей, в результате чего условия работы узла трения значительно

ухудшаются. Так, увеличение зазоров в сопряжениях вследствие износа составляющих их элементов приводит к повышению динамических нагрузок.

На стадии *III* наступает форсированное (катастрофическое) изнашивание. Скорость изнашивания резко возрастает, существенно увеличивается накопленный износ, нежелательные явления в системе усиливаются. На этой стадии резко увеличивается частота отказов узлов трения.

В зависимости от различных факторов (свойство материалов, режимы и условия работы узла трения) кривые изнашивания имеют разный вид (рис. 4.1, б–г).

На кривой (см. рис. 4.1, б) отсутствует участок форсированного изнашивания. Кривые на рисунке 4.1, в соответствуют случаям, когда приработка практически отсутствует. Этот случай характерен для изнашивания рабочих органов строительной-дорожной техники.

В отдельных случаях приработка деталей может происходить в течении всего срока эксплуатации (см. рис. 4.1, г).

Рассмотренные выше кривые (см. рис. 4.1, а–г) построены с условием непрерывности работы узла трения, от начала приработки до полной выработки или ремонта. В подавляющем большинстве случаев узлы трения работают с перерывами, например, в результате остановки машины. Это приводит к возрастанию скорости изнашивания, а также увеличению износа. Так, износ за один пуск машины может быть равнозначным износу за несколько часов работы при установленном режиме.

4.5. Разрушение поверхностей трения

Разрушение поверхностей трения, которое можно обнаружить визуально или под микроскопом, происходит в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от материалов и условий трения.

Можно выделить следующие элементарные виды разрушения поверхностей.

Микрорезание. При внедрении на достаточную глубину твердая частица абразива или продукта изнашивания может произвести микрорезание материала с образованием микростружки. Микрорезание при трении и изнашивании проявляется редко, так как глубина внедрения недостаточна при действующих нагрузках.

Царапание. Образовавшаяся или появившаяся на поверхности трения частица при скольжении перемещает в стороны и поднимает материал, оставляя царапину. Последняя обрывается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического контакта, при раздроблении частицы, ее вдавливании или износе за пределы области трения.

Отслаивание. Материал при пластическом течении может отесняться в сторону от поверхности трения и после исчерпания способности к дальнейшему течению отслаиваться. В процессе течения часть материала наплывает на окисные пленки и теряет связь с основной его массой.

Выкрашивание. Это распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях качения. Для выкрашивания характерна произвольная форма ямок с рваными краями.

Глубинное вырывание. Возникает при относительном движении тел, когда образовавшийся вследствие их молекулярного взаимодействия спай прочнее одного или обоих материалов. Разрушение происходит в глубине одного из тел.

Перенос материала. Свойственен всем видам трения, кроме трения при жидкостной смазке, и обнаруживается при таких технологических операциях, как резание, клепка и сборка болтовых соединений: металл переносится с пневматического молотка на заклепки, с ключа на гайки, с резца на металл.

4.6. Виды изнашивания. Классификация видов изнашивания

Работа узла трения сопровождается большим количеством сложных процессов, протекающих в поверхностных слоях. Из-за многообразия причин изнашивания, условий и режимов работы узлов трения невозможно представить единые классификационные признаки процессов изнашивания.

Одну из первых классификаций видов изнашивания предложил А.К. Зайцев. Существует ряд других классификаций, отличающихся различными признаками. Б.И. Костецким было предложено различать ведущий (преобладающий) и сопутствующие виды изнашивания.

Наибольшее распространение получила классификация видов изнашивания по характеру воздействия на поверхность трения и протекающих на ней процессов при эксплуатации машин.

В машинах наблюдают следующие виды изнашивания.

Механическое изнашивание: абразивное, гидроабразивное (газоабразивное), гидроэрозионное (газоэрозионное), кавитационное, усталостное, изнашивание при фреттинге, изнашивание при заедании.

Молекулярно-механическое изнашивание: схватывание, адгезионное изнашивание.

Коррозионно-механическое изнашивание: окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии, электроэрозионное.

Под механическим изнашиванием понимают изнашивание в результате механического воздействия в контакте. Молекулярно-механическое изнашивание обусловлено появлением местных механических связей с последующим их разрушением, сопровождающихся вырыванием частиц металла одной из деталей. Коррозионно-механическое изнашивание – это изнашивание, при котором механическое взаимодействие сопровождается химическим и (или) электрическим взаимодействием материалов пары трения со средой.

На возникновение какого-либо вида изнашивания и повышение его интенсивности влияют:

- свойства материалов поверхностей трения деталей;
- свойства и качества смазочных материалов;
- способы подвода смазки к трущимся поверхностям;
- давление и место подачи смазочного материала к трущимся поверхностям;
- форма и размеры шероховатости и трущихся поверхностей;
- характер приложения нагрузки;
- скорость относительного перемещения трущихся тел и ее изменение во времени (разгон автомобиля, торможение двигателем);
- температурный режим работы пары трения;
- присутствие механических и химических примесей;
- режим работы.

4.6.1. Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание – это разрушение поверхности детали в результате его взаимодействия с твердыми частицами (абразивом). Абразивным материалом называют материал естественного или искусственного происхождения, зерна которого имеют достаточную твердость и обладают способностью резания (царапания).

Таковыми частицами могут быть микровыступы, твердые частицы грунта, металлическая стружка, песок, оксидная пленка, нагар, про-

дукты износа и т.д., попавшие в зону силового контакта сопряженных поверхностей. Твердые частицы могут находиться как в закреплённом состоянии (неподвижно закрепленные твердые зерна), так и в свободном.

Абразивному изнашиванию подвержены большое количество деталей машин, работающих в абразивной среде (ходовая часть гусеничных тракторов и дорожно-строительных машин, рабочие органы сельскохозяйственных машин и металлорежущих станков, узлы бурильного оборудования нефтяной и газовой промышленности и т.д.).

Поверхность детали может быть разрушена как в результате одноактного воздействия абразива, так и многоактного процесса деформирования поверхности абразивными частицами.

По характеру силового воздействия абразивных частиц на трущиеся поверхности детали различают (рис. 4.2):

- а – скольжение детали по монолитному образцу;
- б – качение детали по абразиву;
- в – соударение с частицами абразива;
- г – соударение детали с монолитным абразивом;
- д – влияние потока абразивных частиц на поверхность детали;
- е – скольжение детали в массе абразивных частиц;
- ж – взаимодействие сопряженных деталей в контакте с абразивными частицами.

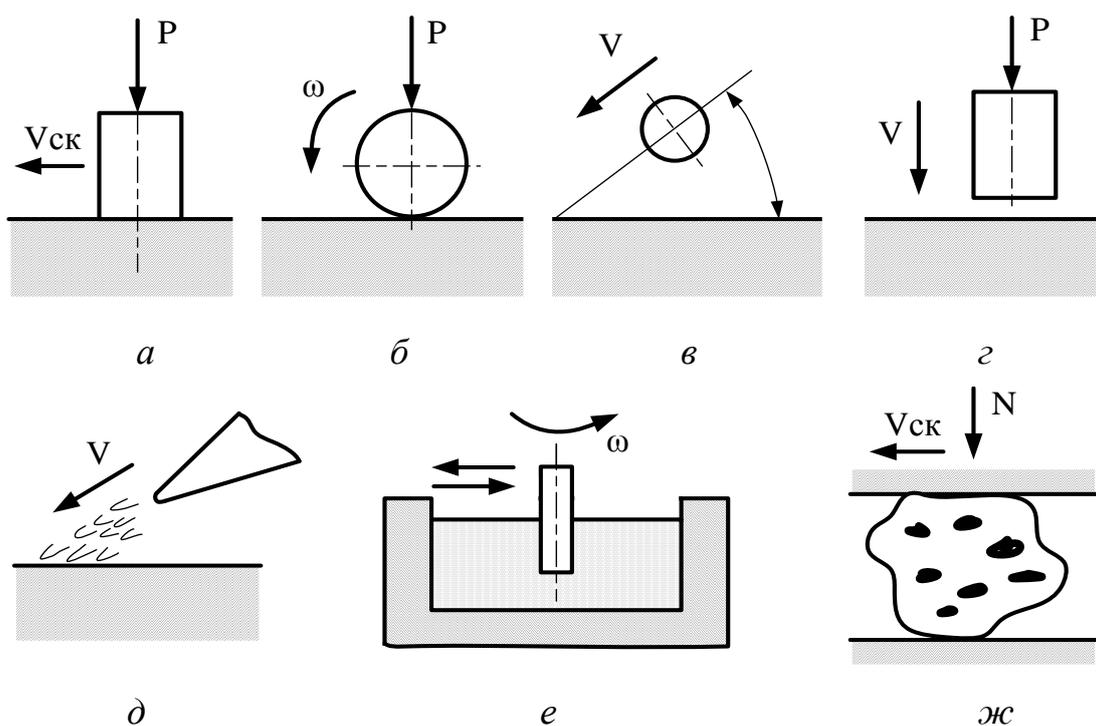


Рис. 4.2. Схемы взаимодействия абразивных частиц с деталью

На процесс абразивного изнашивания влияют различные факторы: природа абразивных частиц, их форма и размер, агрессивность среды, свойство изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, температура и т.п.

Рассмотрим влияние некоторых факторов.

Экспериментально установлено, что если размер частиц не превышает 5 мкм, то они, имея большую развитую поверхность, абсорбируют на себе продукты окисления масла, что может снизить интенсивность изнашивания детали. Многие исследования показывают, что частицы с размерами менее 5 мкм уменьшают износ частицы, размером более 5 мкм увеличивают износ.

Прочность абразивных частиц с уменьшением их размеров возрастает, особенно интенсивно начиная со 100 мкм. Сравнительная твердость материалов показана на рисунке 4.3.

Соотношение твердости материала H_M и абразива H_a оказывает влияние на процесс абразивного изнашивания.

При выполнении условия

$$K_T = H_M / H_a < 0,5 \quad (4.4)$$

возможно прямое разрушение материала.

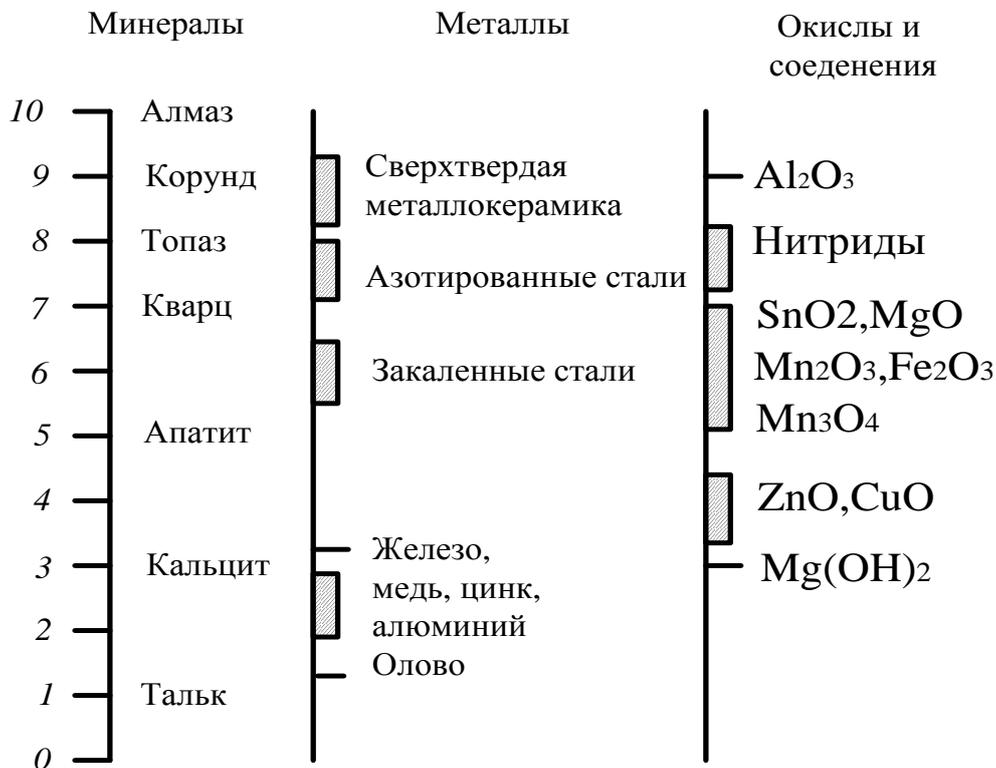


Рис. 4.3. Твердость материалов по шкале Мооса

При K_T больше 0,7 происходит многоцикловое разрушение.

Стойкость абразивному изнашиванию также зависит от состава и структуры поверхностных слоев.

Повышению износостойкости способствуют:

- насыщение поверхностных слоев элементами, образующими высокотвердые соединения карбидов, нитридов, боридов металлов;
- способность более мягких структур удерживать высокотвердые кристаллы в поверхностном слое;
- способность материала упрочняться при деформировании;
- различные виды обработки поверхности (закалка, цементация, азотирование, борирование, обкатывание роликами, гидрополирование, напыление износостойких материалов, обработка лучом лазера, термохимические и физические методы и т.д.).

Стойкость материалов при абразивном изнашивании в большой степени зависит от условий и режимов эксплуатации. Так, двигатель автомобиля, эксплуатируемого в песчаных районах, требует капитального ремонта после пробега в 15 тыс. км, тогда как в условиях незапыленного воздуха он проходит без ремонта 150 тыс. км и более.

В таблице 4.2 приведены некоторые значения относительной износостойкости материалов от условий эксплуатации.

Таблица 4.2

**Относительная износостойкость материалов
при различных условиях эксплуатации**

Рабочий орган	Материал	Относительная износостойкость
Нож бульдозера	Сталь 25Л	1,0
	Наплавочные материалы:	
	ОЗН 400	3,4
	Т-620	5,1
	Релит ($WC+W_2C$)	10,4
Зуб ковша экскаватора	Сталь 25Л	1,0
	Наплавочные материалы:	
	ОЗН 400	3,2
	Т-620	6,6
	Релит	8,7
Лемех плуга	Сталь 55Л	1,0
	Наплавочные материалы:	
	Т-620	5,9
	Сталинит	6,9
	Релит	17,5

Помещение абразивных частиц в зону силового контакта деталей со смазочным материалом резко увеличивает износ. Это наблюдается в подшипниках скольжения двигателей, цилиндропоршневой группе, трансмиссиях и т.д. Концентрация абразивных частиц также способствует возрастанию износа. Эффективными методами защиты от попадания абразива в зону трения являются различные уплотнения, фильтры, отстойники и др.

Рассматривая процесс абразивного изнашивания, необходимо отметить частные случаи его проявления: абразивное изнашивание при ударе; гидро- и газоабразивное изнашивание; изнашивание полимеров при наличии абразива.

Процесс разрушения детали при ударном взаимодействии между деталью и абразивом называют ударно-абразивным изнашиванием. Этому разрушению подвергаются детали буровых долот, камне- и рудомелющих агрегатов, породоразрушающий инструмент пневмо- и гидроударников, детали гусеничного хода машин и др.

Изнашивание деталей при ударных нагрузках по абразиву имеет ряд особенностей. На этот вид изнашивания оказывает влияние слой абразива, энергия удара, форма и площадь контакта, размер частиц, соотношение твердости материала и абразива.

Выбор материалов для режима ударно-абразивного изнашивания необходимо основывать на следующих критериях: износостойкость, прочность, пластичность, ударная вязкость.

Изнашивание при ударе определяется различными факторами, такими как ударное воздействие детали, внедрение частиц в металл, упругие и пластические свойства поверхностного слоя, усталостные явления, структурные превращения.

В зависимости от свойств материала разрушение может иметь различную природу: хрупкое разрушение срезом, малоцикловую усталость, вязкое разрушение. Для ударно-абразивного изнашивания характерно образование на поверхности трения лунок в результате локальной пластической деформации металла.

Еще одной разновидностью абразивного изнашивания является гидроабразивное изнашивание. Гидро- и газоабразивное изнашивание возникает при действии на поверхность деталей потоков жидкости или газа, содержащих абразивные частицы. Абразивные частицы попадают в поток жидкости (газа) в результате загрязнения при небрежной заправке, плохой фильтрации и очистке. Этому виду изнашивания подвержены детали водяных, масляных и топливных насосов, гидроусилителей, гидроприводов тормозных и других систем.

Изнашивание в потоке жидкости или газа может иметь различный характер в зависимости от скорости потока, условий обтекания и связанной с этим турбулентности и возможности возникновения кавитации, от угла атаки твердых частиц и поверхности металла.

При допущении, что среда неагрессивна к поверхности детали, следует различать два случая взаимодействия абразивных частиц с материалом.

1. Прямой удар (угол атаки α равен 90°). В зависимости от массы частиц, скорости их падения, свойств абразива и физико-механических свойств материала детали возникают упругая деформация, пластическая деформация, крупное разрушение, перенаклеп с отделением материала в виде чешуек.

2. Косой удар (угол атаки α больше нуля и менее 90°). При углах атаки не больше угла трения на характер повреждений поверхности сильно влияют касательная составляющая импульса и сопротивление материала воздействию касательных сил на поверхность.

При отсутствии абразивных частиц в струях жидкостей или газов наблюдается эрозионный износ.

4.6.2. Усталостное изнашивание

Наиболее общей формой повреждаемости при трении является *усталость*, протекающая под действием высоких знакопеременных и циклических упругопластических нагрузок, воспринимаемых локальными участками поверхностей на фоне тепловых, химических, адгезионных и других контактных взаимодействий поверхностей.

Усталостное изнашивание (питтинг – от англ. pit – яма) характеризуется наличием двух фаз: скрытого периода, в течение которого отсутствует видимое разрушение материала поверхностного слоя и происходит постепенное накопление дефектов, и фазы быстрого разрушения, когда при достижении определенной концентрации микроповреждений «уставший» материал поверхностного слоя диспергируется в виде частиц износа.

Усталостный износ наиболее характерен для узлов трения с начальным точечным или линейным контактом деталей. К таким узлам можно отнести опоры качения, зубчатые передачи, кулачковые механизмы, колесо-рельс и т.д. Усталость материалов может иметь малоцикловою (при пластических деформациях) и многоцикловою (при упругих деформациях) характер.

На природу возникновения усталостного изнашивания существовали различные точки зрения. Впервые в своих работах указал Бейбли в 1903 г. Он обнаружил наличие дефектного сверхпластичного слоя, отличающегося от объемных свойств материала, усталость которого приводила отделение материала в виде частиц износа. В 30-е годы прошлого века М.М. Хрущев, обнаружив периодические изменения коэффициента трения и интенсивности износа, посчитал это признаком нормальной работы узла трения. И.В. Крагельский обнаружил, что циклическое воздействие твердым выступом на поверхность вращающегося цилиндрического образца после определенного числа циклов вызывает лавинообразное диспергирование материала поверхностного слоя. Он объяснял усталостное изнашивание действием на материал знакопеременных упругих деформаций. Японскими учеными была также установлена аналогичная цикличность изменения упругой деформации решетки поверхностей трения. Вопросами усталостного разрушения занимались также такие ученые, как Е.А. Марченко, А.Л. Жарин, Ю.Н. Дроздов.

При изучении усталостного изнашивания поверхностных слоев важно выяснить, где формируются очаги и какую область поверхностного слоя охватывает данный процесс. Такие ученые, как И.В. Крагельский, Дж. Холинг, Д.Г. Громаковский и др. считали, что область локализации процесса сосредоточена на вершинах неровностей контактирующих поверхностей.

При усталостном изнашивании формируются две области накопления повреждаемости (рис. 4.4): первая сосредоточена в тонком поверхностном слое, накапливающим дефекты и разрушающемся в режиме малоциклового усталости при нормальном усталостном изнашивании; вторая распределяется на большую глубину и протекает при многоцикловом режиме.

В случае усталостного изнашивания необходимо подвергать упрочнению тот слой, в котором происходит разрушение. Если упрочняется слой меньшей глубины, то материал начинает отслаиваться на больших площадях.

Как уже отмечалось ранее, усталостное изнашивание возникает под действием больших удельных повторно-переменных нагрузок, превышающих предел текучести металла, в результате чего образуются микропластические деформации сжатия и упрочнения поверхностных слоев, происходит зарождение трещин на поверхностях трения. Впоследствии микротрещины растут и образуются ямки выкра-

шивания. При этом росту трещин и выкрашиванию в них материалов способствует смазочный материал, работающий по механизму расклинивания. Глубина впадин зависит от свойств металла, удельных давлений и размера контактных поверхностей.

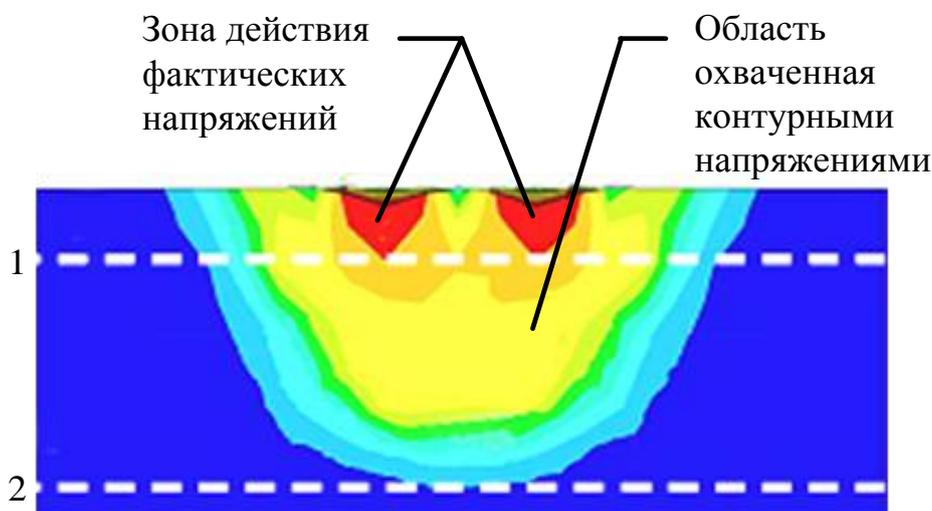


Рис. 4.4. Схема образования слоев, подвергаемых малоцикловой (1) и многоцикловой усталости (2)

Первичные повреждения возникают в микрообъемах, неблагоприятно ориентированных относительно действия нагрузки, преднапряженных остаточными напряжениями и ослабленных местными дефектами. Постепенно накапливаясь и суммируясь, локальные повреждения дают начало общему разрушению детали.

Процесс возникновения усталостной трещины состоит из нескольких стадий. Трещины зарождаются на первых этапах нагружения в границах кристаллических объемов в результате пластических сдвигов пачек кристаллических плоскостей, параллельных действию максимальных касательных напряжений, т.е. направленных под углом примерно 45° к растягивающим напряжениям. В зависимости от ориентации кристаллитов сдвиги могут происходить в одной плоскости, одновременно по двум или трем плоскостям.

Образование трещин происходит за счет размножения и перемещения дислокаций. Скопление вакансий вызывает разрыхление структуры, возникновение субмикропор и образование первичных трещин.

На начальных стадиях процесс обратим. При прекращении действия напряжений материал возвращается в исходное состояние. Если напряжения продолжают действовать, то процесс повреждения раз-

вивается. Постепенно распространяясь, дислокации выходят на поверхность зерна. На определенном этапе происходит массовый прорыв дислокаций через межзеренные прослойки и переход трещины в смежное зерно. Средняя величина напряжения, необходимого для преодоления межзеренных барьеров, определяет сопротивление усталости материала.

В процессах усталостного повреждения большую роль играет очаговое тепловыделение в микрообъемах, подвергающихся деформациям. В результате повышения температуры прочность материала в микрообъемах снижается, что облегчает образование новых пластических сдвигов, которые, в свою очередь, способствуют повышению температуры. У закаленных сталей микронагрев вызывает локальный отпуск и возникновение в перенапряженных микрообъемах трооститной или сорбитной структуры с пониженной по сравнению с мартенситом прочностью.

На процесс усталостного изнашивания большое влияние оказывают пластические деформации, протекающие в зоне контакта. Согласно теории Губера-Мизеса-Генки, пластические деформации при сложном напряженном состоянии возникают тогда, когда удельная потенциальная энергия деформирования достигает некоторого предельного значения, определенного для каждого материала. При этом предельная удельная нагрузка при усталостном многократном деформировании рассчитывается по формуле

$$P_{кр} = 2,9 \frac{d_{пр}}{E_{пр}(\sigma_{пр}/P_{max})} \zeta^2, \quad (4.5)$$

где $d_{пр}$ – приведенный диаметр, м;

$E_{пр}$ – предел выносливости материала, МПа;

ζ – коэффициент упрочнения;

$\sigma_{пр}$ – максимальное приведенное напряжение, МПа.

Максимальные напряжения, возникающие в зоне контакта, рассчитываются по формуле Герца

$$P_{max} = 0,418 \sqrt{P \cdot E \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}, \quad (4.6)$$

где P – удельная нагрузка, кг/мм²;

E – приведенный модуль упругости, МПа;

R_1 и R_2 – радиусы кривизны соприкасающихся тел, мм.

Полуширина площадки контакта

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{P}{E} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}. \quad (4.7)$$

Характер распределения напряжений в поверхностном слое зависит от соотношения касательных и нормальных нагрузок. При наличии касательной нагрузки в конце площадки контакта появляется зона растяжения, максимальные напряжения в которой растут с увеличением касательной нагрузки.

К методам предупреждения и снижения усталостного изнашивания рабочих поверхностей можно отнести: применение объемной и поверхностной закалки с высокотемпературным отпуском; применение сталей с повышенными показателями вязкости (никелевые и др.); повышение предела усталости материала методами механически создаваемого поверхностного упрочнения (обкатка гладкими роликами, дробеструйная обработка и др.); точный монтаж подшипников и зубчатых передач и правильное их смазывание.

4.6.3. Изнашивание вследствие пластической деформации

Изнашивание в результате действия пластической деформации (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов. Пластическое деформирование обычно сопровождается износом металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения. Здесь же имеется в виду деформация, распространяющаяся на всю деталь или на значительные ее объемы.

Смятие является характерным видом повреждения шпоночных пазов и шпонок, шлицевых соединений, штифтов и упоров, резьбовых соединений и других деталей. Пластическая деформация вызывается либо чрезмерными допускаемыми напряжениями, либо случайными значительными перегрузками. Во избежание смятия шпоночных пазов и среза шпонок рекомендуется выбирать допускаемые напряжения смятия 1,5 ГПа при знакопеременной нагрузке с толчками и 2 ГПа при постоянной нагрузке. При чугунной ступице допускаемые напряжения ниже на 60 %.

Смятие характерно для деталей, работающих в условиях ударного нагружения. К ним относятся, например, регулировочные болты коромысел приводов клапанов и седла шаровых клапанов.

В тихоходных зубчатых передачах с колесами из сталей невысокой твердости возникают значительные пластические деформации с образованием канавок по полюсной линии у ведущих зубьев.

Под действием высоких контактных напряжений разрушается масляная пленка и происходит течение поверхностных слоев металла в направлении скольжения с образованием наплыва. Этим предопределяется форма повреждения. Интенсивность пластической деформации можно снизить, повысив вязкость масла, а также используя стали большей твердости.

Пластической деформации подвержены также рельсы, колеса и бандажи подвижного состава железных дорог. При эксплуатации рельс на железнодорожных путях вследствие прокатывающего (качение со скольжением) действия колес под нагрузкой, удара колес на стыках и неуравновешенных инерционных сил механизма локомотива пластическая деформация распространяется на глубину почти всей головки рельса и сопровождается отчетливо различимым смятием верха и рабочих краев головки.

Образование вмятин и углублений на поверхности трения – один из видов повреждения подшипников качения.

При сдавливании посторонних частиц, попавших в зону контакта (тело качения – кольца), могут образовываться вмятины на дорожках качения (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Бринеллирование на дорожке качения в результате вибрации в неподвижном состоянии

Многочисленные исследования показывают, что преобладающим видом повреждений дорожек качения является особый вид пластической деформации на дорожках качения – *бринеллирование*. И.Я. Дьяков и У.Б. Утемисов в своей работе исследовали 43 шарнира трактора. Оказалось, что из данной партии 50...60 % крестовин вышли из строя из-за износа в виде бринеллирования на шипе. В отношении природы образования канавок единого мнения нет.

Малый угол перемещения игольчатых роликов, недостаточность смазки, проникновение пыли в подшипник, иногда пониженная твердость цилиндрической поверхности цапфы, вибрация от разбалансированного карданного вала создают условия для износа поверхности цапф по типу бринеллирования (рис. 4.6).

Интенсивному пластическому деформированию подвержены даже чугуны. Так, у поршневых колец двигателей внутреннего сгорания после износа на глубину фаски образуется заусенец за пределами нижней опорной поверхности кольца. Разрушение заусенца способствует усилению абразивного изнашивания цилиндров.



Рис. 4.6. Разрушение карданного шарнира в виде бринеллирования

4.6.4. Кавитационное изнашивание

Под *кавитацией* понимают явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости полостей в виде пузырей, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. Дословно кавитация – это полость, пустота.

Это явление обусловлено следующим. В движущемся с большой скоростью потоке, при его сужении и наличии препятствий на его пути, давление может упасть до значения, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям, может про-

изойти 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 большим ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности потока.

При определенных типах кавитации, на площади в 1 см^2 в течение 1 с, могут образовываться и разрушаться более 30 млн кавитационных пузырьков.

Гидродинамическая кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромоторах и в потоках, обтекающих лопасти центробежных, пропеллерных насосов и лопасти гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных соединений, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным повреждениям. Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия. Она способствует закоксовыванию распылителей форсунок двигателей внутреннего сгорания.

Труднообтекаемая форма и неровности поверхностей, включая неровности, образовавшиеся по причине кавитационного изнашивания, служат причиной образования вихрей и отставания струй от стенок рабочих каналов, что способствует возникновению или усилению кавитации. Наличие коррозионной среды и абразивных частиц ускоряет процесс изнашивания.

Существуют различные предпосылки наступления и протекания кавитационного изнашивания. При замыкании (быстром заполнении жидкостью) до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам. Из нескольких миллионов образовавшихся кавитационных пузырьков примерно один из 32 тыс. участвует в разрушении. Под действием ударов поверхность металла начинает деформироваться и подвергаться наклепу, появляются линии сдвига, происходит как бы своеобразное травление с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение и перенаклеп материала на отдельных микроучастках. Разрушается,

прежде всего, менее прочная структурная составляющая (в сталях – феррит, в чугунах – графитовые включения). Затем может последовать выкрашивание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пределах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерен и связи между ними.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования. Однако возможность кавитации всегда следует учитывать.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и материала деталей. Влияние вязкости незначительно. С увеличением температуры поверхностного натяжения изнашивание происходит более интенсивно. Наибольшая интенсивность изнашивания наблюдается в воде с температурой 50 °С.

Кавитационная стойкость материала определяется его составом и структурой. Повышение содержания углерода в углеродистой стали увеличивает ее стойкость. Однако при содержании углерода 0,8 % и более она начинает падать. Закалка с нагревом ТВЧ, цементация, поверхностное упрочнение также способствуют значительному увеличению кавитационной стойкости стали.

При колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может уменьшиться и вызвать образование кавитационных пузырей. Условия кавитации зависят от внешнего давления на систему и насыщенности жидкости воздухом. Возникновению вибрационной кавитации способствуют звуковые и ультразвуковые колебания.

4.6.5. Молекулярно-механическое изнашивание

Молекулярно-механическое изнашивание происходит в результате механического и молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей. В результате схватывания поверхностей в месте контакта происходит глубинное вырывание материала, поэтому его называют изнашиванием при заедании. Часто наблюдается при недостатке смазки, больших нагрузках, температурах и скоростях скольжения. Этот вид изнашивания разделяют на изнашивание схватыванием первого и второго рода.

Схватывание первого рода заключается в микросваривании участков трущихся поверхностей. Изнашивание схватыванием первого рода возникает при трении поверхностей с малыми скоростями (1 м/с), отсутствии смазки и при больших нагрузках в местах контакта поверхностей. Под действием большой нагрузки между отдельными выступами трущихся поверхностей возникают металлические связи и упрочнение в месте схватывания. При перемещении происходит вырывание стружки из менее твердой поверхности или царапанье ее упрочненным участком. Изнашивание схватыванием первого рода сопровождается наиболее высоким коэффициентом трения, выделением большого количества тепла и наибольшей интенсивностью изнашивания.

Схватывание второго рода – адгезионное изнашивание. Этот вид разрушения наблюдается при трении скольжения с большими скоростями, недостаточной смазке и со значительными удельными нагрузками. Оно также характеризуется интенсивным повышением температуры в поверхностных слоях и увеличением их пластичности. Первые этапы идентичны схватыванию первого рода. Схватывание контактирующих поверхностей разъединяется не в местах сваривания, а происходит с переносом части одного металла на поверхность другого (адгезия металла). Далее при более жестких условиях трения трущиеся сваривавшиеся металлы вообще могут не разъединиться, что приводит к заклиниванию или полной потере подвижности контактирующих деталей. Результаты этого вида изнашивания легко наблюдать, например, на шейках коленчатого вала, зеркале цилиндра и т.д. Часто заклинивают поршни в двигателях, коленчатые валы и пр.

Явление схватывания имеет место при некоторых технологических процессах: холодная сварка металлов, получение биметаллов методом холодной прокатки. В этом случае схватывание желательно, так как происходит образование прочных металлических связей. В трибосопряжениях схватывание всегда вредно и несовместимо с нормальной работой узлов трения. Также схватывание можно наблюдать между инструментом и обрабатываемым металлом при обработке давлением, а при резании оно проявляется в виде наростообразования на резце.

На сегодняшний день нет единой точки зрения на механизм процесса схватывания при трении. Исследованием схватывания занимались такие ученые, как И.Н. Лагунцев, Ф.П. Боуден, С.Б. Айбиндер и др.

Опыты по трению чистых металлических поверхностей в вакууме показали, что при относительном движении поверхности повреждаются, и сопротивление их смещению того же порядка, что и сопротивление материалов срезу. Это говорит о том, что для образования прочных связей между металлами в холодном состоянии необходимо отсутствие на соприкасающихся поверхностях всякого рода пленок и загрязнений.

Если в обычных условиях приложить нагрузку к двум соприкасающимся металлическим образцам, чтобы обеспечить между ними достаточную площадь контакта, то в результате взаимодействия атомов произойдет схватывание поверхностей, представляющее собой спонтанный процесс, протекающий с выделением энергии.

Схватывание между металлами, покрытыми пленками окислов или другими химическими соединениями и адсорбированными пленками, без специальной полной очистки поверхностей не будет проявляться. Схватывание будет возможно в том случае, когда появятся условия для удаления пленок на достаточном числе участков и при сближении поверхностей на этих участках на межатомное расстояние. Такие условия могут быть в результате пластической деформации при действии одной только нормальной нагрузки и зависят от механических свойств пленки и металла. Если сопротивление пленки деформированию значительно больше, чем сопротивление металла (твердость пленки выше твердости металла), то при достаточной нагрузке металл пластически деформируется. Пленка при этом разрывается на отдельные части, связанные с металлом. Происходит выход основного металла в промежутки между частями пленки и совершается схватывание на чистых вновь образованных поверхностях металла. Если твердость пленки меньше твердости металла, то пленка деформируется вместе с металлом, не разрушаясь, схватывания не возникает. Для условий схватывания важно, чтобы твердость пленки была выше твердости металла в начальный период и в процессе деформации поверхности. Один и тот же металл, в зависимости от свойств пленок на его поверхности, может как обладать способностью к схватыванию, так и не обладать.

Схватывание зависит от толщины металлических и оксидных пленок в результате присутствия на них адсорбированных пленок из внешней среды. Загрязнения с пленок стекают и препятствуют схватыванию поверхностей.

Схватывание поверхностей может быть не только при повышенных температурах, но и при нормальных. Рост температуры способствует более интенсивному протеканию схватывания.

Схватывание между металлическими поверхностями при некоторых режимах трения без смазочного материала возникает сравнительно легко. Пластическое деформирование на площадках фактического контакта и внедрение одной поверхности металла в другую создают условия для удаления окисных и адсорбированных пленок масел, жиров, газов и влаги и образования узлов схватывания. Узел схватывания – это местное соединение поверхностей, образующееся при трении в результате схватывания. Местное соединение поверхностей при трении вследствие адгезии называют узлом адгезии.

Необходимой предпосылкой образования узла схватывания на поверхностях трения является разрушение смазочной пленки. Она разрушается под действием высокой температуры при упругой деформации поверхностных слоев, при наличии значительной пластической деформации или при совместном действии повышенной температуры и пластической деформации.

Схватывание может произойти не только при взаимном перемещении поверхностей, но и при длительном неподвижном контакте сопряженных деталей в окислительной среде (воздухе, водяном паре и т.д.) вследствие срачивания окисных пленок в зазорах. Такое схватывание наблюдается в предохранительных клапанах и запорной арматуре в виде «прикипания» тарелки к корпусу или к седлу и в резьбовых соединениях, работающих при повышенной температуре, в виде заедания при их разборке.

Рассмотрим различные случаи проявления схватывания и адгезии, наблюдаемые при испытаниях на машинах трения и при исследовании узлов трения.

1. Вырывание материала в виде микроскопических и субмикроскопических частиц с одной поверхности и перенос их на другую (рис. 4.7). Такое проявление схватывания не вызывает катастрофического разрушения.

2. Образование тонкой пленки мягкого материала (медь и ее сплавы, бронза, свинец) на твердой сопряженной поверхности. Такое схватывание имеет следующие последствия: может наблюдаться интенсивное изнашивание; заедание при высокой скорости скольжения; резкое увеличение силы трения из-за намазывания (на износ особо не влияет); образование тонкого слоя меди на стальной поверхности

(износ не увеличивается) (рис. 4.8). В случае образования пленки на мягкой «подкладке» сила трения будет увеличиваться, так как происходит увеличение фактической площади контакта.

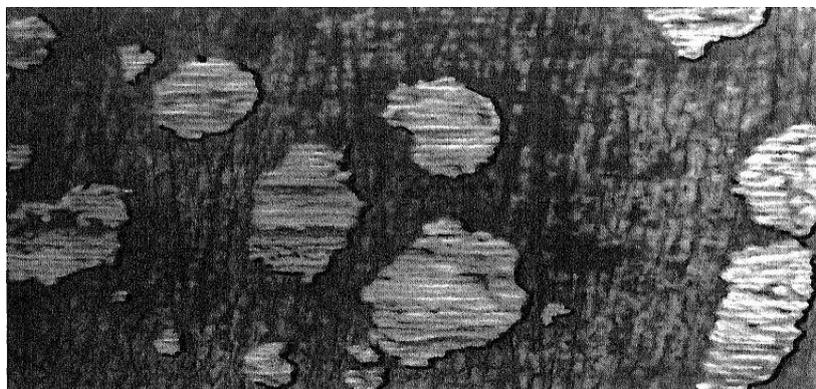


Рис. 4.7. Поверхность стального шлифованного образца с частицами меди



Рис. 4.8. Болт шарнирного соединения с тонким слоем бронзы

3. Намазывание является стадией предкатастрофического повреждения деталей. На рисунке 4.9 показано катастрофическое изнашивание бронзовой втулки поршневого двигателя внутреннего сгорания в результате намазывания тонкого слоя бронзы на валик.

4. Перенос твердого материала на мягкую поверхность (сталь на бронзу, бронза на резину и т.д.). В результате на более твердой поверхности образуются риски из-за царапающего действия перенесенного материала. Перенесенный материал находится в наклепанном состоянии. Такой вид схватывания приводит к потере работоспособности узла трения, проявляется достаточно редко в результате действия высоких давлений и температур.

5. Глубинное вырывание материала с образованием борозд, уступов и впадин (рис. 4.10). Процесс сопровождается наклепом по-

верхностного слоя на большую глубину. Происходят структурные изменения с переориентацией зерен по направлению движения поверхности. Глубинное вырывание – явление катастрофическое. Оно приводит к повышению скорости изнашивания в десятки тысяч раз, увеличивает силу трения, вызывает заклинивание и поломку.

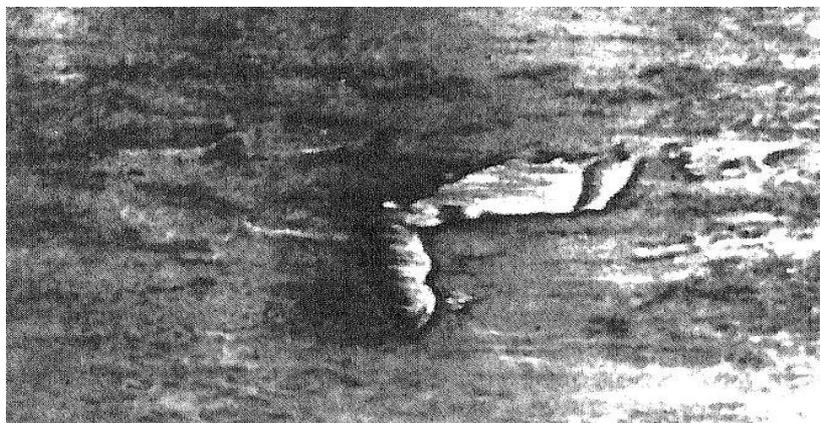


Рис. 4.9. Поверхность стального валика с наволакиванием толстого слоя бронзы



Рис. 4.10. Вырывание материала на поверхности стального золотника топливного насоса

Основным направлением борьбы со схватыванием является локализация пластической деформации при трении в тонких пограничных слоях. Это достигается применением смазочных материалов с антизадирными присадками. Снизить вероятность схватывания поверхностей трения возможно следующими способами: подбирают материалы с пониженной способностью к схватыванию (антифрикционные сплавы: баббиты, бронзы); вводят легирующие элементы, повышая твердость материалов; ограничивают контактные напряжения

и скорость относительного перемещения; проводят химико-термическую обработку; на поверхности деталей наносят пленки мягких материалов (свинец, олово); вводят в сплавы мягкие составляющие или материалы со слоистой структурой (графит, дисульфид молибдена); применяют антифрикционные полимерные покрытия; в пористую металлическую основу вводят жидкие или пластичные смазочные материалы.

4.6.6. Коррозионно-механическое изнашивание

Коррозия (от лат. *corrosio* – разъедание) – это самопроизвольное разрушение металлов в результате химического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Коррозионные разрушения в этом случае развиваются при воздействии на трущиеся поверхности таких агрессивных веществ, как химически активные газы, кислотные примеси смазочных материалов, почва и др. *Коррозионно-механическое изнашивание* возникает в результате механического воздействия на трущиеся поверхности.

Этот вид изнашивания вызывается главным образом химической реакцией материала поверхности трения с кислородом или окисляющей окружающей средой. Коррозия металла в той или иной среде может происходить независимо от того, имеется трение или нет. Совместное действие коррозии, нагружения и механического изнашивания усиливает интенсивность разрушения поверхностей деталей. Сам процесс коррозионно-механического изнашивания главным образом обусловлен электрохимическим коррозионным процессом. Электрохимические процессы существенно ускоряются при деформировании поверхностного слоя. В условиях трения коррозионные процессы ускоряются в тысячи раз.

Коррозионные процессы отличаются широким распространением и разнообразием условий и сред, в которых они протекают. Поэтому пока нет единой и всеобъемлющей классификации встречающихся случаев коррозии. Рассмотрим классификацию в зависимости от различных факторов.

По типу агрессивных сред, в которых протекает процесс разрушения, коррозия может быть следующих видов: газовая коррозия; атмосферная коррозия; коррозия в неэлектролитах; коррозия в электролитах; подземная коррозия; биокоррозия; коррозия блуждающим током.

По условиям протекания коррозионного процесса различаются следующие виды: контактная коррозия; щелевая коррозия; коррозия при неполном погружении; коррозия при полном погружении; коррозия при переменном погружении; коррозия при трении; межкристаллитная коррозия; коррозия под напряжением.

По характеру разрушения: сплошная коррозия, охватывающая всю поверхность (равномерная; неравномерная; избирательная); локальная (местная) коррозия, охватывающая отдельные участки (пятнами, язвенная, точечная (или питтинг), сквозная, межкристаллитная).

Основной является классификация по механизму протекания процесса. Различают химическую и электрохимическую коррозию.

Коррозия может стать составной частью процесса изнашивания деталей двигателей внутреннего сгорания независимо от рабочего процесса в них. Так, при сгорании бензина помимо водяных паров образуются двуокись углерода, небольшое количество окислов серы из органических сернистых соединений в составе топлива, окись азота в очень малых количествах и др. При взаимодействии с водяными парами эти продукты образуют кислоты – угольную, сернистую, серную, азотистую, азотную и др., которые в основном удаляются из цилиндра с отработавшими газами. При пониженной температуре стенок цилиндра кислоты легко конденсируются, повышая интенсивность изнашивания стенок и поршневых колец, усиливая коррозию поршня, бобышек и поршневого пальца.

Проблема коррозии подшипников возникла после внедрения в быстроходные двигатели внутреннего сгорания антифрикционных свинцовых, медно-свинцовых и кадмиевых сплавов. Все антифрикционные сплавы в какой-то мере корродируют под воздействием органических кислот, содержащихся в маслах или образующихся в них во время работы.

Масла, окисляясь, дают перекиси, которые вызывают реакции, заканчивающиеся образованием органических кислот. Воздействию последних слабо подвержены оловянные баббиты, сильнее реагируют свинцово-мышьяковистые сплавы и свинцовый баббит. По данным исследователей Б.Л. Лосикова и др., коррозионная стойкость медно-свинцовых, свинцово-щелочных и кадмиево-серебряных сплавов в 500...1700 раз ниже, чем оловянных баббитов.

Последовательное разрушение свинцово-щелочного сплава происходит следующим образом: вначале на гладкой блестящей поверхности появляются матовые шероховатые на ощупь пятна, представ-

ляющие собой скопления тончайших каналов, уходящих в глубину заливки на всю ее толщину; образуются раковины в местах пятен; появляются трещины между раковинами и происходит выкрашивание заливки по линии трещин (рис. 4.11).

Коррозионно-механическому изнашиванию особого вида подвержены рабочие органы машин по переработке сырья, содержащего жирные кислоты. К таким машинам относятся, например, шнекпресссы для производства растительного масла, машины для резания, дробления, размалывания и перемешивания сырья на мясокомбинатах. Проблема защиты от коррозии свинцовых, медно-свинцовых и кадмиевых сплавов была решена при использовании антикоррозионных присадок к маслу.

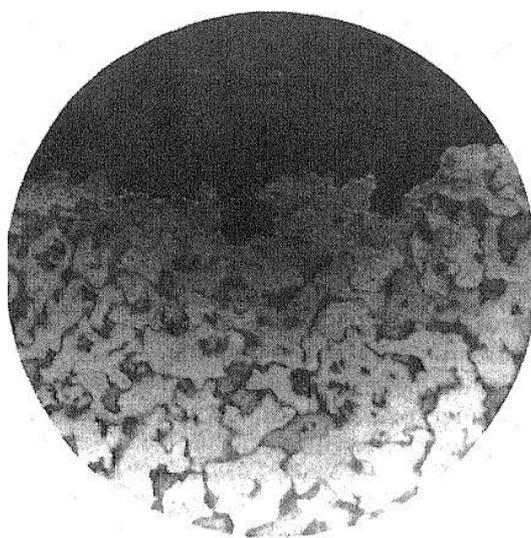


Рис. 4.11. Сечение поврежденной коррозией поверхности подшипника из свинцовистой бронзы

Эти присадки представляют собой органические вещества, содержащие фосфор. Пассивация поверхности подшипника происходит в результате образования на ней защитной пленки, ближайšie к металлу слои которой связаны с ним химически, а последующие слои удерживаются силами физической адсорбции. Пленка срывается и восстанавливается.

Центробежные насосы перекачивают морскую, речную или воду из скважин с различным содержанием солей и взвешенных частиц. В ходе технологического процесса на предприятиях пищевой, химической и других отраслей промышленности насосы перекачивают как кислую, так и щелочную воду. Для защиты от коррозии валы центробежных водяных насосов облицовывают рубашками (защитными

втулками) из бронзы, стали или чугуна, работающими в паре трения с сальниковой набивкой.

4.6.7. Изнашивание при фреттинг-коррозии

Фреттинг-коррозия – это коррозионно-механическое разрушение в местах проскальзывания поверхностей, плотно прижатых друг к другу при колебаниях с малой амплитудой, вращениях, вибрациях. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Она возникает вследствие непрерывного разрушения защитной оксидной пленки в точках подвижного контакта. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионностойкие 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.

Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Примерами такого вида изнашивания являются: посадки с запрессовкой колец подшипников качения; поршневые пальцы, втулки горячей посадки; сопряженные поверхности вала со ступицами лопаток турбин, компрессоров; колесные бандажи; болтовые, клиновые и штифтовые соединения. Фреттинг-коррозии подвержены металлические канаты и канатные шкивы, контактные поверхности подшипников качения, рессор, пружин, клапанов и толкателей, кулачковых механизмов и т.п. Наиболее опасное последствие фреттинг-коррозии – это растрескивание деталей из-за снижения коррозионно-усталостной прочности.

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

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии упрощенно показан на рисунке 4.12. Первоначально контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (см. рис. 4.12, *а*). При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные окисными пленками (см. рис. 4.12, *б*), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (см. рис. 4.12, *в*). В ней повышается

давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения повышается температура, происходит образование белых твердых нетравящихся структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

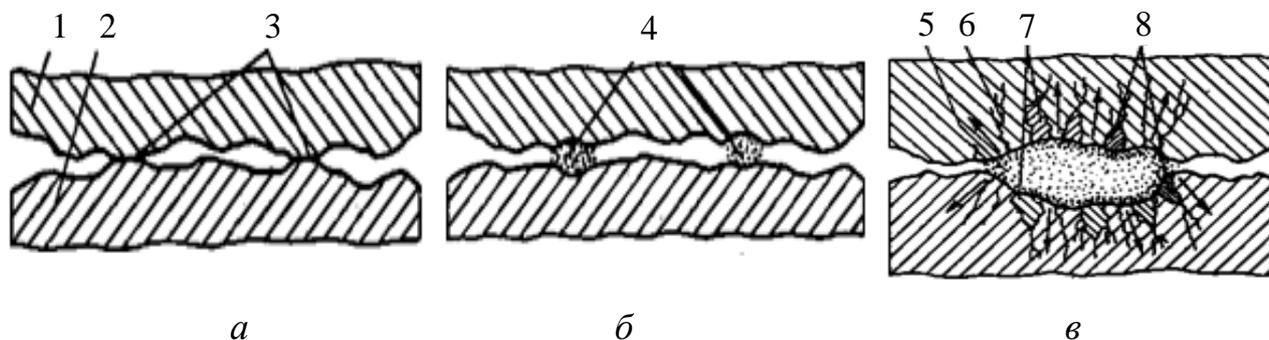


Рис. 4.12. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии: 1, 2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей; 4 – мелкие зарождающиеся каверны; 5 – общая большая каверна; 6 – трещины; 7 – отколовшиеся объемы металла; 8 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

Фреттинг-коррозия обусловлена изменением физико-химических свойств сопряженных поверхностей вследствие пластического деформирования или относительного перемещения, разрушения защитных оксидных пленок, адсорбционного взаимодействия материала со средой. Коррозионные процессы могут иметь химическую или электрохимическую природу. Скорость фреттинг-коррозии определяется природой материалов поверхностей трения, коррозионной активностью среды, амплитудой проскальзывания, контактным давлением, числом и частотой циклов относительных смещений контактирующих деталей, степенью прилегания сопряженных поверхностей, температурой в зоне контакта.

В развитии фреттинг-коррозии выделяют три стадии:

- упрочнение контактирующих поверхностей за счет пластических деформаций в зоне контакта;
- развитие окислительных процессов;
- развитие глубинного вырывания материала с резким возрастанием скорости изнашивания.

Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии возрастает с увеличением нагрузки, амплитуды и частоты колебаний, с ростом относительного проскальзывания, температуры.

Для снижения вероятности возникновения фреттинг-коррозии следует: уменьшить микросмещения, уменьшить силы трения; сосредоточить скольжение в промежуточной зоне; повысить твердость одной из деталей, использовать оптимальные конструктивные решения; подбирать материалы контактных пар; снизить агрессивность среды (использовать смазочные материалы, ингибиторы коррозии); создавать сжимающих напряжений в поверхностных слоях деталей путем пластического деформирования или химико-термической обработкой; наносить защитные металлические покрытия.

4.6.8. Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание – коррозионно-механическое изнашивание, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. Окислительное изнашивание возникает при образовании на поверхности трения защитных пленок в результате взаимодействия материала с кислородом или окисляющей окружающей средой и последующего разрушения этих пленок механическим воздействием с повторением процесса. От других видов коррозионно-механического изнашивания оно отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Изучением окислительного изнашивания занимались Б.И. Костецкий и его ученики.

Окислительное изнашивание характеризуется протеканием одновременно двух процессов – пластической деформации малых объемов металла поверхностных слоев и проникновения кислорода воздуха в деформированные слои. В первой стадии происходит разрушение и удаление мельчайших твердых частиц металла из непрерывно образующихся (от проникновения кислорода) пленок. Для второй стадии характерно образование и выкрашивание пластически недеформирующихся хрупких окислов.

Интенсивность изнашивания зависит от окислов, препятствующих схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление поверхностей активизируется пластической деформацией, поэтому необходимо создавать поверхности трения с высокой твердостью. Повышение температуры способствует росту окисных пленок, а вибрация разрушает их.

Окислительное изнашивание возникает при трении скольжения и трении качения. При трении скольжения оно становится ведущим, а при трении качения сопутствующим другим видам изнашивания. Проявляется этот вид изнашивания при сравнительно невысоких скоростях скольжения и небольших удельных нагрузках, а также на таких деталях, как шейки коленчатых валов цилиндры, поршневые пальцы и др.

Интенсивность изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив рабочую температуру узла трения.

4.6.9. Водородное изнашивание

Открытие эффекта *водородного изнашивания* принадлежит Д.Н. Гаркунову и А.Л. Полякову. Появление водорода в поверхностных слоях обусловлено интенсивным его выделением из смазочных материалов, топлива, окружающей газовой среды и неметаллических пар трения в результате трибохимических реакций.

Присутствие водорода в поверхностных слоях может быть также результатом процессов литья и химико-термической обработки металлов. Адсорбция водорода, его диффузия в поверхностные слои и концентрация на некоторой глубине от поверхности в области максимальных температур обеспечивается спецификой температурного режима трения.

Водородное изнашивание можно описать следующими процессами, происходящими в зоне трения.

1. Интенсивное выделение водорода в зоне трения из водородосодержащих материалов (смазочные материалы, топливо, неметаллические материалы). Причина, спровоцировавшая этот процесс, – трибохимические реакции в зоне силового контакта.

2. Повышение температуры способствует десорбции смазочного материала с поверхности металлической детали.

3. В результате трения происходит адсорбция водорода поверхностью металлической детали.

4. Диффузия водорода в поверхностные слои металлических элементов трущейся пары. Скорость диффузии определяется градиентами температуры и напряжений.

5. Концентрация водорода на некоторой глубине от поверхности трения в зоне максимальной температуры. Причиной этого процесса является градиент температуры под поверхностью.

6. В результате насыщения водородом образуется большое число трещин в зоне контакта, происходит низкотемпературное разрушение поверхностного слоя металлических элементов.

7. Перенасыщение металлических поверхностей водородом приводит к высокотемпературному вязкому разрушению металла.

Поверхностный слой, насыщенный водородом, разрушается в результате образования большого числа трещин по всей зоне деформирования. Водородное изнашивание наблюдают в насосах, перекачивающих продукты нефтеперегонки, при трении полимерсодержащих тормозных колодок и в других узлах.

Водородное изнашивание проявляется в большей или меньшей степени во всех видах изнашивания. Действие водорода может выражаться в незначительном увеличении скорости изнашивания, а также в самостоятельном полном разрушении поверхностей трения. Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Большое влияние на интенсивность водородного изнашивания оказывает влажность воздуха. Это можно объяснить образованием в зоне контакта водорода в результате разложения воды.

Как отмечалось выше, водородный износ может быть вызван не только тем водородом, который образуется при трении, но и водородом, который может образовываться при различных технологических процессах. В.Я. Матюшенко и М.А. Андрейчик определили влияние различных технологических операций на новодоразивание стальной поверхности (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Содержание водорода в поверхности при различных технологических процессах

Технологическая операция	Содержание водорода в см ³ на 100 г
Токарная обработка без СОЖ	0,4
Токарная обработка с СОЖ	5,6
Закалка	12,6
Отпуск	6,8
Цементация	15,4

Технологически приобретенный водород снижает нагрузку стали до заедания и уменьшает ее износостойкость.

В 1926 г. Пфлейль установил влияние водорода на охрупчивание стали, но основные выводы по влиянию водорода на объемную прочность стали были сделаны П. Котерилом. Они сводятся к следующему:

- водород не оказывает существенного влияния на упругие характеристики железа и стали;
- содержание водорода до $0,1 \text{ см}^3/100\text{г}$ не оказывает влияние на твердость стали;
- разрушающее напряжение снижается пропорционально росту концентрации водорода;
- пластичность стали снижается пропорционально повышению концентрации водорода;
- степень охрупчивания стали уменьшается с повышением скорости деформации;
- охрупчивание стали проявляется в интервале температур от минус 100 до плюс 100 °С;
- охрупчивание проявляется только при наличии растягивающих напряжений;
- присутствие водорода меняет характер разрушения стали;
- интенсивность охрупчивания зависит от вида обработки;
- водород вызывает преждевременное хрупкое разрушение высокопрочных легированных сталей при статическом нагружении;
- свойства металла в ненапряженном состоянии не зависят от водорода;
- при неравномерном распределении водорода по образцу области, богатые водородом, будут обладать наименьшей пластичностью при испытании на растяжение.

Б.А. Калачев делит водородное охрупчивание на две группы (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Виды водородного охрупчивания

Вид охрупчивания	Причины, вызывающие охрупчивание	Факторы, влияющие на охрупчивание
Охрупчивание первого рода (обратимо)	Обусловлено источниками в исходном металле вследствие повышенного содержания водорода	Усиливается с повышением скорости деформации
Охрупчивание второго рода (обратимо и необратимо)	Обусловлено источниками, образуемыми в металле с повышенным содержанием водорода в процессе пластической деформации	Развивается при малых скоростях деформации

А.А. Поляковым и Д.Н. Гаркуновым было установлено, что имеются два основных вида изнашивания стальных и чугунных деталей под действие водорода: изнашивание диспергированием и изнашивание разрушением.

При водородном изнашивании диспергированием (ВИДИС) каких-либо изменений в поверхностном слое деталей вследствие обычного износа при диспергировании не наблюдается. Водород усиливает (в зависимости от его количества в поверхностном слое) диспергирование стали или чугуна. На поверхностях трения нет вырывов, задиров, заметного переноса материала с одной поверхности трения на другую. Они могут иметь блеск и очень мелкие царапины, которые не видны невооруженным глазом и расположены в направлении движения.

Водородное изнашивание разрушением (ВИРАЗ) имеет специфическую особенность, поверхностный слой стальной или чугунной детали разрушается мгновенно на глубину до 1...2 мкм. Это происходит, когда поверхностный слой накапливает большое количество водорода. Трение десорбирует смазочный материал, и водород получает возможность занять большее число адсорбционных центров на поверхности. Концентрация водорода в стали непрерывно возрастает. Водород попадает в микротрещины, поры, межкристаллитные границы и др. Периодически происходит деформирование поверхностного слоя, и объем дефектных мест (полостей) изменяется. Поступающий в полости водород молизуется и, не имея возможности выйти обратно при уменьшении объема, стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Повторение цикла вызывает эффект накопления, продолжающийся до тех пор, пока внутреннее давление в полостях не вызовет разрушения стали по всем развившимся и соединившимся трещинам.

При выборе материалов для узлов трения необходимо учитывать степень их наводороживания и охрупчивания. Так, уменьшение водородного изнашивания возможно легированием стали хромом, ванадием, титаном; применением смазочных материалов и введением в них ингибиторов; наполнением пластмассовой матрицы металлической стружкой; наведением электростатического поля.

Скорость изнашивания может быть существенно понижена при формировании в процессе трения на поверхности детали пленок меди. Образование таких сервовитных пленок связывают с избирательным растворением и осаждением отдельных элементов сплавов, со-

державших медь. Это явление имеет электрохимическую природу и получило название «избирательного переноса».

4.6.10. Изнашивание при избирательном переносе

В течение длительного времени главным направлением борьбы с изнашиванием и уменьшением силы трения было повышение твердости поверхности трения деталей машин. В этом случае уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, уменьшаются пластические деформации и окислительные процессы, а также действие абразива.

Однако с увеличением нагрузок в узлах трения, ухудшающих в некоторых случаях условия смазывания деталей с применением в машинах специальных смазочных жидкостей, традиционные методы повышения износостойкости деталей путем увеличения их твердости перестали себя оправдывать, так как фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

В 1956 г. при исследовании технического состояния узлов трения самолета ИЛ на разных этапах его эксплуатации было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди на поверхностях деталей в парах трения сталь-бронза. Поверхности смазывались спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1...2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь (рис. 4.13).

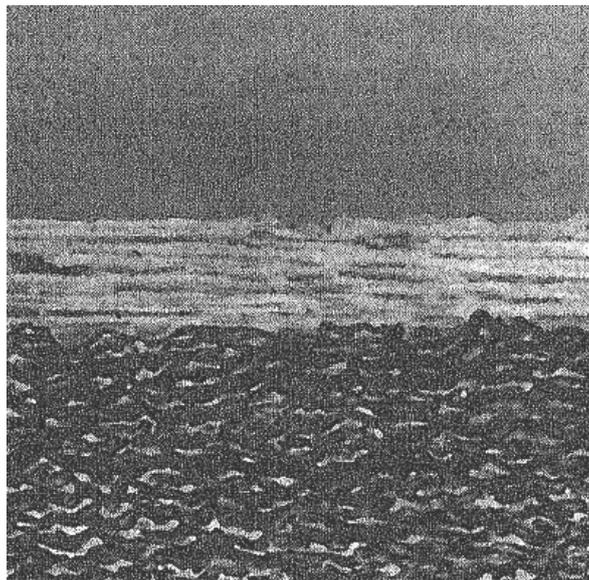


Рис. 4.13. Пленка меди на стальной поверхности

Она способствовала резкому снижению интенсивности изнашивания пары трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Почти в то же время подобное явление было обнаружено в парах трения сталь-бронза при использовании смазочного материала ЦИАТИМ-201 (в шарнирно-болтовых соединениях самолетов), а также в паре сталь-сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании масло-фреоновой смесью.

Образование тонких пленок меди связывают с избирательным растворением и осаждением отдельных элементов сплавов, содержащих в своем составе медь. Свойство таких пленок отличается от свойств медных пленок, получаемых гальваническим или другим способом. Роль пленки сводится к формированию третьего тела на поверхности контакта, в котором происходит разрыв фрикционных связей. Это явление имеет электрохимическую природу и получило название избирательного переноса. Открыли явление избирательного переноса Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский.

Рассмотрим проявление явления избирательного переноса в узлах трения на примере компрессора бытового холодильника. Медная пленка образуется в паре сталь-сталь в результате растворения медных трубок охладителя холодильника. Толщина медной пленки составляла 1...2 мкм. Пленка формируется из ионов меди, которые образуются в смазочном материале (смесь 50 % масла и 50 % фреона) в результате незначительного коррозионного процесса медных трубок охладителя. Ионы меди, поступая в масло-фреоновую смесь, перемещались в зону контакта, ионы поступают вместе с охлаждающей смесью, исполняющей также роль смазочного материала. После того, как пленка образовалась, происходит снижение давления в зоне контакта, уменьшаются сила трения и температура. Компрессоры холодильника могут работать без ремонта десятки лет.

Можно отметить следующую цепочку взаимообусловленных явлений, происходящих в смазочной системе компрессора и на поверхностях трения деталей.

В начальный период в паре трения сталь-сталь смазочный материал окисляется, образующиеся кислоты растворяют поверхностные слои медных трубок и доставляют в смазочную систему ионы меди. Ионы меди, циркулируя в смазочной системе, осаждаются на поверхности деталей только в зоне трения, в результате образуется тонкая пленка меди, покрывающая поверхности трения.

Установившийся режим. После того как поверхности трения покроются пленкой меди, пара трения сталь-сталь заменяется парой медь-медь. Это приводит к снижению интенсивности окисления масло-фреоновой смеси, прекращается растворение трубок. При нарушении сплошности медной пленки режим работы сопряжения становится более тяжелым, это вызывает усиление окислительных процессов в смазочном материале и, как следствие, растворение меди трубок и «залечивание» поврежденной поверхности.

В установившемся режиме трения медная пленка не разрушается. Она может переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты изнашивания удерживаются в зазоре электрическими силами.

Избирательный перенос – явление, противоположное изнашиванию. Процессы при избирательном переносе необратимы и самоорганизованы. Сила трения, сопротивление сдвигу и интенсивность изнашивания снижаются.

Металлическую защитную пленку, образующуюся в процессе трения, называют сервовитной (от лат. servo-witte – спасти жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатости поверхностей трения стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. В этих условиях мягкий материал работает по мягкому материалу. Распределение нагрузки по поверхности трения происходит равномерно, поэтому на единицу площади она незначительна. Это способствует продлению ресурса узла, трения.

Механизм формирования сервовитной пленки может изменяться в зависимости от вида смазочного материала, условий работы узла трения и конструкционных материалов, из которых изготовлены контактирующие детали.

Исследование механизма избирательного переноса, его закономерностей и областей рационального применения привело к некоторому изменению установившихся ранее взглядов на ряд вопросов триботехники: структуру и свойства тонких поверхностных слоев трущихся деталей машин; механизм изнашивания и смазочного дей-

ствия; пути создания смазочных материалов и присадок к ним; оптимальную структуру и свойства износостойких и антифрикционных материалов и приработочных покрытий и т.д.

Явление избирательного переноса апробировано, используется в различных областях: самолетах, автомобилях, станках, паровых машинах, дизелях тепловозов, прессовом оборудовании, редукторах, оборудовании химической промышленности, механизмах морских судов, магистральных нефтепроводах, электробурах, холодильниках, гидронасосах, нефтепромысловом оборудовании. Избирательный перенос применяется также в приборах и может быть использован для повышения стойкости режущего инструмента при сверлении, фрезеровании, протягивании, дорновании и нарезании резьбы.

Избирательный перенос позволяет: снизить металлозатраты (на 15...20 %) за счет большей грузоподъемности (в 1,5...2 раза) пар трения; увеличить срок работы узла трения (в 2 раза); сократить период приработки двигателей (в 3 раза) и редукторов (до 10 раз); сократить расход электроэнергии; в подшипниках качения и скольжения уменьшить расход смазочных материалов (до 2 раз); повысить КПД глобоидных редукторов с 0,7 до 0,85; винтовой пары с 0,25 до 0,5; увеличить экономию драгоценных металлов (золота, платины, серебра) в приборах в 2...3 раза за счет большей надежности электрических контактов.

4.6.11. Эрозионное изнашивание

В широком понимании *эрозия* – это 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. Эрозия подразделяется на газовую, кавитационную, абразивную и электрическую.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара 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 взрывы отдельных объемов или групп зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладающих способностью к наклепу, вначале

накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпывается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая стенки трещины.

В начальный период развитие эрозии на гладкой поверхности идет крайне медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это можно объяснить повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются рабочие кромки золотников гидравлических агрегатов. Струи топлива, проникая во время отсечки с большой скоростью в зазор между цилиндрическими поверхностями золотника и втулки, разрушают металл у рабочей кромки. Это случай щелевой эрозии, которой подвержены клапаны запорных и регулирующих устройств гидравлических и паровых систем. Также эрозионному изнашиванию подвержены стальные и чугунные поршневые кольца авиационных двигателей, поверхности выпускных клапанов. На рабочих поверхностях образуются продолговатые раковины (рис. 4.14).

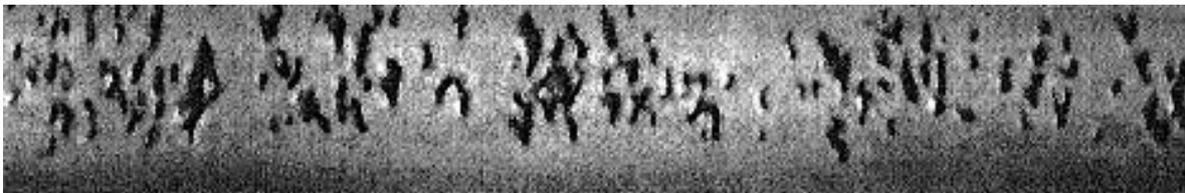


Рис. 4.14. Очаги эрозии на поверхности поршневого кольца авиационного двигателя

На процесс эрозионного изнашивания оказывает влияние присутствие посторонних частиц в потоке. Например, лопатки турбин более интенсивно изнашиваются под действием пара, содержащего частицы соли. Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится эрозионно-абразивным. Скорость эрозионного изнашивания зависит от свойств твердых частиц, их концентрации, скорости движения в потоке.

Часто эрозия протекает совместно с коррозией. *Коррозионно-эрозионное изнашивание* представляет собой разновидность коррози-

онно-механического изнашивания. Роль коррозии и эрозии зависит от механического и химического взаимодействия. Этому виду изнашивания подвержены гребные винты, разрушение которых усилилось с переходом от паровых поршневых машин, к паровым турбинам с повышенной частотой вращения винтов.

Газовая коррозия и эрозия действуют совместно, например, в выпускных клапанах высоконапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания и на входных кромках лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

Кавитационно-эрозионное изнашивание можно наблюдать на поверхности плоского золотника плунжерного керосинового насоса высокого давления.

Подвидом эрозионного изнашивания является электроэрозионное изнашивание. Электроэрозионное изнашивание происходит в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. Этот вид изнашивания наблюдается на контактах магнитных пускателей, коллекторах электрических машин и др.

Контрольные вопросы к разделу 4

1. Что такое изнашивание, износ и износостойкость?
2. Количественные характеристики изнашивания. Классы износостойкости.
3. Дайте определение предельному и допустимому износу.
4. Механизм изнашивания, основные явления, происходящие в зоне контакта.
5. Стадии изнашивания.
6. Назовите элементарные виды разрушения.
7. Классификация видов изнашивания.
8. В чем заключается абразивное изнашивание?
9. Назовите узлы трения, для которых характерно усталостное изнашивание.
10. Что такое бринеллирование?
11. В чем заключается схватывание первого рода?
12. Чем вызвано коррозионно-механическое изнашивание?
13. Что такое фреттинг-коррозия?
14. Виды водородного изнашивания.
15. В чем заключается эффект избирательного переноса?

5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА

5.1. Классификация методов измерения износа

Существующие методы измерения износа заключаются как в измерении размеров изнашивающихся деталей с помощью обычных средств, так и в использовании методов на основе ядерно-физических процессов.

Область применения тех или иных методов измерения определяют:

- поставленная цель исследования;
- требуемая точность измерения;
- возможность измерения малых износов;
- время, необходимое для измерения износа;
- возможность измерения износа в условиях эксплуатации без разборки и остановки машины;
- затраты времени и средств, необходимые для всего цикла подготовки, осуществления и обработки результатов измерения.

Для измерения износа применяются интегральные и дифференциальные методы оценки повреждений.

Наиболее целесообразны дифференциальные методы, позволяющие определить распределение износа по всей поверхности трения и оценить влияние износа на выходные параметры изделия. Иногда применяются методы оценки износа по выходным параметрам изделия или сопряжения. Классификация методов измерения износа приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Классификация методов измерения износа поверхностей трения

Метод измерения		Разновидности метода
1		2
Интегральный	Оценка суммарного износа	- по изменению массы образца; - по изменению объема образца; - измерение зазора сопряжения
	Продукты износа в смазке	- химический анализ; - спектральный анализ; - при помощи радиоактивных изотопов

1		2
Дифференциальный	Микрометрирования	- измерение размеров; - профилографирование
	Метод искусственных баз	- метод отпечатка; - метод лунок; - метод слепков
	Метод поверхностной активации	- активация участка; - применение вставок
Изменение выходных параметров сопряжения		Изменение: коэффициента трения, утечек или расходов смазки, температуры

Измерение износа по потере веса или объема детали применяется, как правило, при исследовании образцов и непригодно для большинства деталей машин. Оценка износа по изменению выходных параметров сопряжения дает лишь косвенное представление о величине износа.

Рассмотрим основные методы измерения и оценки износа поверхностей трения при работе различных сопряжений в условиях их эксплуатации или испытаний.

5.2. Метод микрометрических измерений

Наиболее распространенным и доступным методом определения величины износа деталей является метод микрометрических измерений. Этот метод чаще всего используется при условии больших абсолютных величин износа деталей. Он основан на измерении детали при помощи механических контактных или каких-либо других приборов до и после проведения испытаний на изнашивание.

Оценку износа методом микрометрирования производят с помощью микрометров, концевых мер длины, инструментальных и универсальных микроскопов, индикаторных нутромеров, рычажно-механических приборов или других приборов, точность которых обычно находится в пределах от 1 до 10 мкм. Точность измерений зависит от условий контакта исследуемой поверхности с измерительным наконечником прибора, а также качества очистки детали от загрязнений.

В большинстве случаев применяются те же универсальные и специальные средства, которые используются для контроля точности

поверхности детали при ее изготовлении. Например, многомерное приспособление для контроля размеров поршней двигателя внутреннего сгорания может быть использовано и для измерения параметров изношенного поршня. При небольших размерах детали и возможности ее демонтажа измерения износа можно производить с помощью инструментального или универсального микроскопов, оптиметра, проектора, измерительной машины и других приборов. Для деталей больших размеров, измерение износа которых необходимо проводить без разборки машины, часто разрабатывают специальные приспособления с применением универсальных измерительных приборов.

Метод микрометрирования относится к традиционным методам измерения размеров и не учитывает специфику износа. Недостатками данного метода являются невозможность осуществления измерения износа в процессе работы машины, необходимость, как правило, частичной разборки узла или демонтажа измеряемой детали, громоздкость приспособлений при измерении непосредственно на машине, трудность измерения исследуемой поверхности в одном и том же месте до и после испытаний.

5.3. Определение износа по потере веса

Весовой метод обычно применяют для определения износа небольших деталей. Их взвешивают до и после испытаний. Перед взвешиванием детали должны быть тщательно промыты и просушены. После проведения испытаний с них необходимо смыть продукты износа, смазки и т.п.

Точность этого метода зависит от точности весов и находится в пределах $(0,05...5) \cdot 10^{-6}$ г. В качестве средств измерения используют различные весы: приборные ПР-500, аналитические ВА-200, АДВ-200М, технические, настольные, закрытые ВНЗ-3 и др.

Определение величины линейного износа по потере веса осуществляется путем вычислений, основанных на предположении, что износ происходит равномерно по поверхности трения. Линейная характеристика износа представляет собой высоту изношенного слоя, приходящуюся на единицу пути трения, Весовой износ пересчитывается в линейный по следующей зависимости:

$$I = \frac{Q}{S \cdot v \cdot L \cdot 10^5}, \quad (5.1)$$

где Q – весовой износ, мг;
 S – площадь поверхности трения, см²;
 ν – удельный вес материала, г/см³;
 L – путь трения, м.

Величину износа весовым методом не рекомендуется определять в тех случаях, когда изменение размеров детали произошло не только вследствие отделения частиц, но и по причине пластического деформирования. Весовой метод оказывается неприемлемым и при определении величины износа деталей из пористых материалов, пропитанных маслом. В этом случае невозможно установить, было ли одинаково количество масла в порах при взвешивании до и после испытания.

5.4. Метод профилографирования

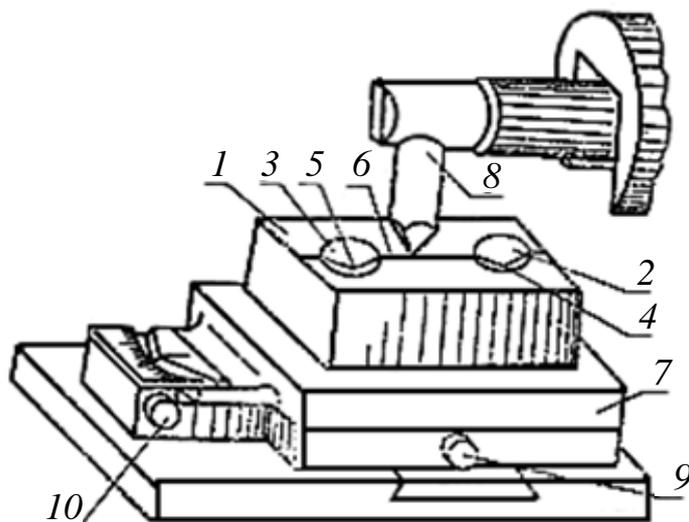
В ряде случаев при малых значениях износа применяют метод профилографирования. Этот метод является разновидностью микрометрического метода измерения износа.

На профилографе измеряется величина так называемого «первичного износа», за которую принимается разница в высоте микронеровностей от линии впадин до гребешка, замеренная на одном и том же участке в различные моменты испытания. Для измерения износа методом профилографирования используют профилограф-профилометры (рис. 5.1).

Данный метод заключается в следующем. С одного и того же микроучастка исследуемой поверхности (б) снимаются профилограммы до начала испытания и после.

На профилограммах контуры одних и тех же впадин остаются постоянными, а выступы, вследствие износа, меняют свою высоту. Определяя общее уменьшение выступов от линии впадин, получаем величину первичного износа. В случае, если она превышает высоту неровностей в качестве постоянной базы, от которой производится измерение, выбирается нерабочий участок исследуемой поверхности.

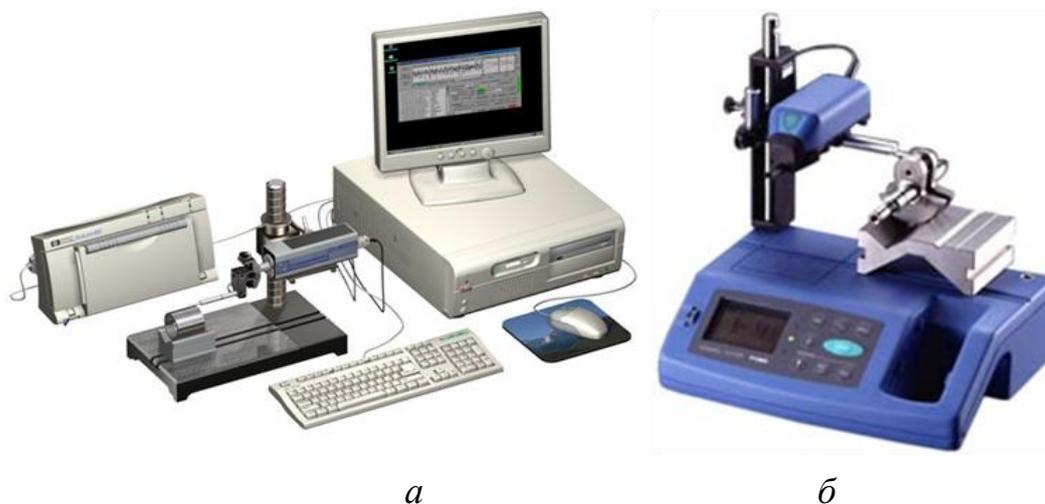
Постоянной базой может служить дно специально нанесенной на исследуемой поверхности царапины или углубления (2) и (3), глубина которой превышает величину измеряемого износа. Снятие профилограммы производится в направлении, перпендикулярном направлению царапины.



*Рис. 5.1. Определение износа на профилограф-профилометре:
1 – деталь; 2 и 3 – отпечатки; 4 и 5 – низшие точки отпечатков;
6 – трасса профилографирования; 7 – предметный столик; 8 – щуп;
9 и 10 – микровинты*

После нанесения отпечатков (2) и (3) деталь или образец (1) устанавливают на предметный столик (7), который может перемещаться в горизонтальной плоскости поперек движения иглы (8) щупа. Образец (1) микровинтами (9) и (10) устанавливают относительно трассы профилографирования (6) таким образом, чтобы острие иглы (8) проходило через низшие точки (4) и (5) отпечатков (2) и (3). Глубину отпечатков контролируют по отклонению пера самописца.

На рисунке 5.2 показаны современные модели профилограф-профилометров.



*Рис. 5.2. Профилограф-профилометры:
а – модель БВ-7669; б – модель «HOMMEL TESTER T1000 basic»*

Недостатком метода является невозможность снятия профилограммы до и после испытания с одного и того же сечения, что приводит к появлению погрешности в определении величины линейного износа. Эта погрешность тем больше, чем меньше сама величина износа по сравнению с величиной неровностей поверхности.

Поиск иных способов определения линейного износа поверхностей деталей машин привел к созданию таких методов и приборов, в которых базой для измерения служит сама изнашивающаяся поверхность.

5.5. Метод искусственных баз

Метод искусственных баз заключается в том, что на изнашивающейся поверхности наносят углубление строго определенной формы в виде конуса, пирамиды и т.п. и по уменьшению размеров углубления (отпечатка) судят о величине износа. Это метод позволяет определить местный линейный износ поверхности в тех местах, где нанесены базы, поэтому возможно оценить формы изношенной поверхности.

Метод искусственных баз в зависимости от способа нанесения углубления подразделяется на метод отпечатков, метод высверленных углублений, метод вырезанных лунок.

При методе отпечатков (рис. 5.3, а) для образования углубления применяют алмазную четырехгранную пирамиду с квадратным основанием и углом при вершине между противоположащими гранями в 136° . Такая пирамида применяется в приборах для определения твердости типа ПМТ-3 и Виккерс.

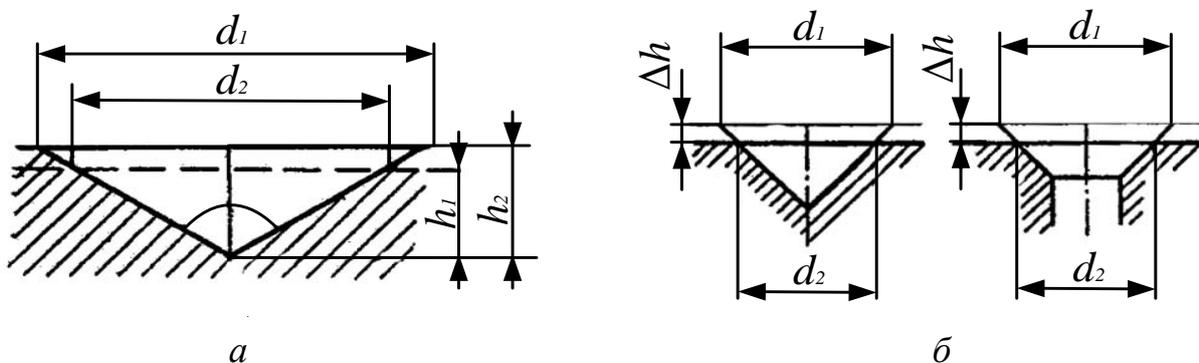


Рис. 5.3. Схема измерения величины износа:
а – методом отпечатков; б – методом высверленных углублений

Пирамида вдавливается под нагрузкой в испытываемую поверхность и измеряется диагональ отпечатка d . Глубина отпечатка вычисляется по формуле

$$h = d / 7, \quad (5.2)$$

где d – диагональ отпечатка, мм.

Величина линейного износа плоской поверхности определяется как разность глубин отпечатка до начала изнашивания и после окончания

$$\Delta h = h_1 - h_2 = (d_1 - d_2) / 7, \quad (5.3)$$

где h_1 – глубин отпечатка до начала изнашивания, мм;
 h_2 – глубин отпечатка после изнашивания, мм;
 d_1 – диагональ отпечатка до начала изнашивания, мм;
 d_2 – диагональ отпечатка после изнашивания, мм.

Такой метод имеет ряд недостатков. При вдавливании пирамиды вокруг отпечатка происходит вспучивание материала, в результате чего искажается форма отпечатка, после снятия нагрузки происходит некоторое восстановление углубления, оно изменяет свою начальную форму. В тех случаях, когда износ сопровождается пластическим деформированием поверхностного слоя, края отпечатка заплывают и теряют отчетливую форму.

Метод отпечатков является одним из немногих видов, имеющих в распоряжении исследователей, позволяющих установить действительную величину линейного износа в заранее выбранном месте и точную картину его распределения по поверхности трения. Большим преимуществом данного метода является высокая точность измерения, позволяющая измерять величины линейного износа порядка долей микрона.

Иногда применяется метод высверленных углублений. На рисунке 5.3, б представлена схема высверленных конических углублений. Этот метод аналогичен методу отпечатков.

Широкое распространение получил метод вырезанных лунок, заключающийся в том, что на исследуемой поверхности вращающимся резцом вырезается углубление (см. рис. 5.4, а).

Дно углубления является постоянной базой. Разность расстояний от исследуемой поверхности трения до дна лунки, определенных

до начала и после испытания, представляет величину линейного износа. Длина лунки определяется при помощи микроскопа. Лунки наносятся вращающимся алмазным резцом, заточенным в виде трехгранной пирамиды с отрицательным передним углом.

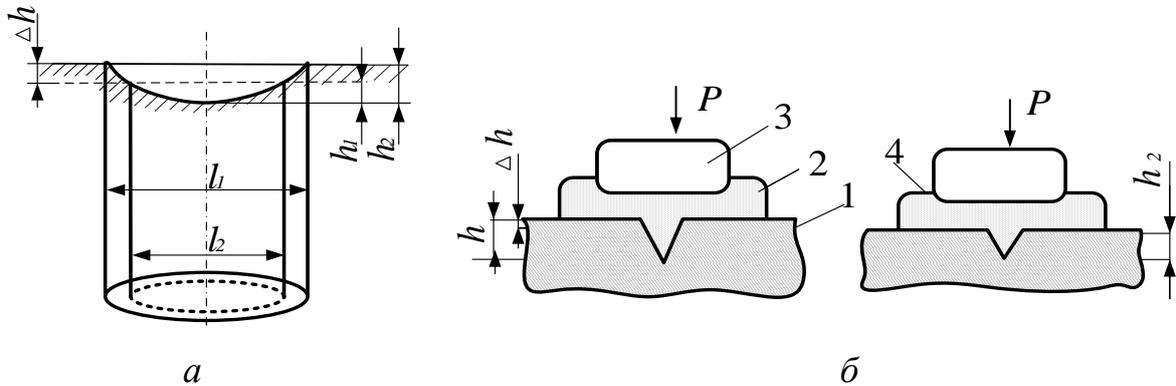


Рис. 5.4. Схема измерения величины износа: а – методом вырезанных лунок; б – методом негативных оттисков (1 – изнашиваемая поверхность детали; 2 – первичный оттиск; 3 – пуансон; 4 – вторичный оттиск)

Точность измерения методом вырезанных лунок выше, чем методом отпечатков, так как соотношение между глубиной лунки и длиной ее находится в пределах 1:50 – 1:80, вместо 1:7 при методе отпечатков.

При исследовании малых величин износа, порядка нескольких микрон, применение метода вырезанных лунок затруднительно, в этом случае следует отдать предпочтение методу отпечатков. Возникают трудности и при определении износа поверхностей, имеющих риски, совпадающие по направлению с длиной лунки, так как при этом очень сложно определить длину лунки. В общем случае вырезанная лунка должна располагаться перпендикулярно к направлению трения данной детали, чтобы концы лунки не сливались с рисками, возникшими на поверхности в процессе трения. Вследствие глубины лунки этот метод невозможно применить для определения износа грубо обработанных поверхностей.

В случае, когда непосредственный замер лунки или отпечатка при помощи микроскопа затруднен либо вообще невозможен (труднодоступное место, отверстие слишком малого диаметра и т.п.), глубину лунки определяют по слепку. Эта разновидность метода искусственных баз заключается в следующем.

С исследуемой поверхности, на которой сделано искусственное углубление, снимают слепок при помощи самотвердеющей массы, или оттиск на пластичном металле или пластмассе (рис. 5.4, б). Затем измеряют при помощи микроскопа высоту h отпечатка углубления, которое может не иметь закономерного соотношения между глубиной и поперечными размерами. По разности двух измерений до и после испытаний определяют величину износа

$$\Delta h = h_1 + h_2. \quad (5.4)$$

Определение износа по слепкам не требует специального оборудования, может производиться как в лабораторных, так и в производственных условиях.

5.6. Определение износа по содержанию продуктов износа в масле

Данный метод основан на взятии пробы в отработанном масле, где накопились продукты износа, представляющие собой металлические частицы, окислы металлов и продукты химического взаимодействия металлов с активными компонентами смазки.

Применение этого метода позволяет избежать разборки машин и их узлов. Метод применяется в лабораторных условиях и при эксплуатации для измерения интегрального износа различных узлов машин. Точность метода характеризуется чувствительностью приборов к содержанию металлических примесей в масле, которая составляет $10^{-6} \dots 10^{-8}$ г на 1 см^3 масла. Линейный износ данным методом оценить затруднительно.

При отборе пробы необходимо, чтобы она характеризовала среднее содержание продуктов износа в смазке.

Для анализа проб масла на содержание железа и других составляющих применяются химические, спектральные и радиометрические методы.

Химический метод основан на определении содержания железа и других продуктов изнашивания в золе сожженной масляной пробы. Непосредственный анализ пробы сложен и длителен.

Спектральный метод основан на определении содержания металлических примесей в смазке посредством спектрального состава пламени при сжигании пробы масла.

Радиометрический метод основан на измерении радиоактивности продуктов изнашивания, содержащихся в смазочном материале, накапливающихся в масляном фильтре в результате износа радиоактивных деталей. Радиоактивность деталей создается введением радиоактивных изотопов в плавку или с помощью покрытия деталей радиоактивным слоем.

5.7. Метод поверхностной активации

Оценка величины износа методом поверхностной активации основана на измерении снижения радиоактивности при изнашивании исследуемой детали, в которой на заданном участке создан радиоактивный объем глубиной 0,05...0,4 мм путем облучения участка заряженными частицами (дейтронами протона, альфа-частицами).

Метод поверхностной активации предназначен для контроля износа деталей при стендовых и эксплуатационных испытаниях без разборки и остановки машины. Использование метода позволяет измерять малые износы, что сокращает время износных испытаний, исследовать динамику износа, автоматизировать контроль износа, измерять износ дистанционно.

При измерении износа крупногабаритных деталей находят применение специальные вставки, которые проходят поверхностную активацию, а затем устанавливаются на изнашивающуюся поверхность. Применение вставок из специальных сплавов позволяет довести общую продолжительность радиоактивности, достаточной для точного измерения износа в пределах 2...2,5 лет, что важно при натурных испытаниях.

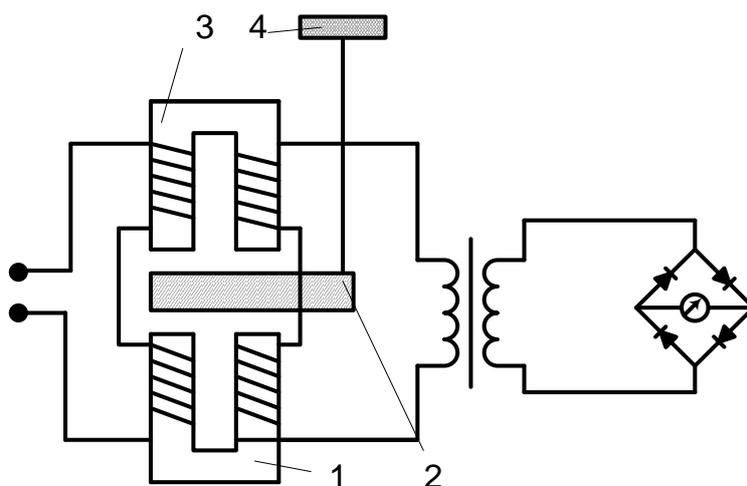
Преимуществом метода поверхностной активации, несмотря на определенную сложность аппаратуры, является возможность получения быстрой и достоверной информации о ходе процесса изнашивания и влиянии на износ режимов работы, смазки и других факторов.

5.8. Индуктивные датчики

При помощи электрических индуктивных датчиков можно измерять износ в процессе испытания без остановки машины. Схема измерения износа приведена на рисунке 5.5. Перемещение образца (4) по мере износа вызывает перемещение якоря (1), вследствие чего изменяются зазоры, влияющие на величину коэффициента индукции

электромагнитов (2), (3), в мостовой схеме. Регистрация износа осуществляется самопишущими или стрелочными приборами.

Основными достоинствами индуктивного метода измерения износа являются: высокая точность измерения, которая может конкурировать с точностью оптических измерений; простота устройства, надежность и большая продолжительность эксплуатации; возможность дистанционного измерения; возможность регистрации изменения величины износа в процессе испытания в виде диаграммы; сравнительно низкая стоимость.



*Рис. 5.5. Схема индуктивного датчика:
1 – якорь; 2, 3 – электромагниты; 4 – образец*

К недостаткам этого метода следует отнести: сравнительную сложность электрических схем; влияние изменения частоты переменного тока на показания датчика; зависимость показаний датчика от внешнего магнитного поля, напряжения сети и температуры; невозможность использования любого индуктивного датчика с любым электроблоком, обслуживающим индуктивные датчики; возможность влияния электромагнитного усилия датчика на его показания из-за деформации деталей, с ним контактирующих.

5.9. Метод тензометрирования

Для определения величины износа образцов в процессе испытания без остановки машины нашли применение проволочные датчики сопротивления (тензодатчики). Они служат для преобразования механического перемещения в изменение электрического сопротивления датчика. Устройство проволочного датчика основано на изме-

нении электрического сопротивления проволоки вследствие ее растяжения или сжатия. При растяжении, сжатии или изгибе упругого элемента сопротивление датчика, наклеенного на него, изменяется прямо пропорционально деформации. Упругий элемент вместе с наклеенными датчиками сопротивления принято называть тензобалкой.

Принципиальная схема измерения величины износа образцов в процессе испытания с применением тензодатчиков показана на рисунке 5.6.

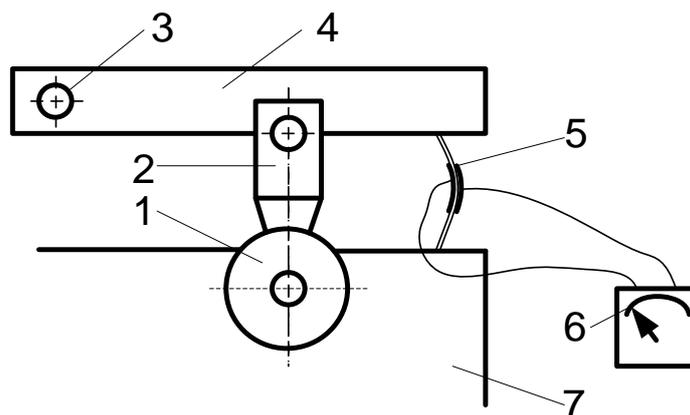


Рис. 5.6. Схема измерения величины износа методом тензометрирования: 1,2 – изнашивающиеся образцы; 3 – шарнир; 4 – каретка; 5 – тензобалка; 6 – гальванометр; 7 – станина

К достоинствам метода определения величины износа при помощи тензометрического микрометрирования следует отнести достаточно высокую точность замера износа, возможность проведения записи износа в виде кривой на бумажной ленте (фотоплёнке) с помощью самопишущих приборов или осциллографов, а также с помощью ЭВМ. Такая запись позволяет судить о характере износа образцов на различных стадиях процесса.

Недостатками этого метода являются невозможность определения износа каждого образца отдельно и небольшие пределы измерения величины износа (от десятков микронов до долей миллиметра). Однако для увеличения предела измерения возможно применение в сочетании с тензодатчиками рычажных механизмов.

Кроме описанных методов, для измерения износа в процессе работы машины могут также применяться методы, основанные на использовании пневматических, емкостных и других первичных преобразователей.

Контрольные вопросы к разделу 5

1. Классификация методов измерения износа.
2. От чего зависит выбор метода?
3. Достоинства и недостатки метода микрометрирования.
4. В чем заключается метод определения износа по потере веса?
5. Недостатки метода профилографирования.
6. В чем заключается метод искусственных баз?
7. Разновидности метода искусственных баз.
8. На чем основан метод определения износа по содержанию продуктов износа в масле? Назовите разновидности метода.
9. В чем заключается метод поверхностной активации?
10. Определение износа с помощью индуктивных датчиков.
11. Определение износа с помощью тензодатчиков. Достоинства и недостатки этого метода.

6. МАТЕРИАЛЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН

6.1. Общие сведения о материалах

Детали узлов трения в зависимости от их назначения изготавливают из конструкционных, фрикционных, износостойких и антифрикционных материалов широкой номенклатуры. Во многих случаях материалы наносят в виде покрытия пленок или накладок на остов из основного конструкционного материала. Иногда при специфических требованиях к электропроводности трущиеся детали изготавливают из сталей и других сплавов специального назначения, окислов металлов, металлокерамических и неметаллических материалов.

Из конструкционных сталей изготавливают детали, которые должны удовлетворять условиям высокой прочности, жесткости или податливости и иметь на тех или иных участках поверхности трения. Это детали типа валов, пальцев, болтов шарниров, зубчатых колес и т.д.

Фрикционные материалы – это материалы, которые в контакте с металлической поверхностью имеют высокий коэффициент трения. Применяются в тормозах и фрикционных муфтах валов. Они характеризуются высокой фрикционной теплостойкостью (способностью сохранять коэффициент трения и износоустойчивость в широком диапазоне температур), низкой способностью к адгезии (они не должны при трении схватываться), высокой теплопроводностью и теплоемкостью, хорошей устойчивостью против теплового удара, возникающего в результате интенсивного выделения тепла в процессе трения. К этим материалам предъявляются также требования по коррозионной стойкости, прирабатываемости, технологичности, экономичности.

Износостойкими называют материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения сравнительно мало изнашиваются. К элементам конструкции, материал которых должен иметь высокую износостойкость, относятся плунжерные пары, зубья ковшей экскаваторов, лемех плуга и рабочие органы большинства технологических машин. В качестве износостойких материалов используются конструкционные стали, упрочненные по всему объему или по рабочим поверхностям деталей, специальные стали, чугуны, порошковые материалы, резину, пластмассы и др.

Антифрикционные материалы – это группа материалов, обладающих низким коэффициентом трения, или материалы, способные уменьшить коэффициент трения других материалов.

Твердые антифрикционные материалы обладают повышенной устойчивостью к износу при продолжительном трении. Используется для покрытия трущихся поверхностей (например, в подшипниках скольжения). Например, такими материалами могут служить латунь, железграфит, бронза или баббит.

Эти материалы должны иметь минимальный коэффициент трения. Структура покрытия должна обеспечивать антисхватывание и возможность быстрой приработки к контртелу. Механические характеристики материала должны соответствовать эксплуатационным нагрузкам, а сами материалы должны быть достаточно износостойкими и пластичными.

Процесс нанесения антифрикционных покрытий должен обеспечивать выполнение тех же требований, что и для износостойких покрытий, с той лишь разницей, что при его проведении строго не ограничивается толщина покрытия.

6.2. Требования, предъявляемые к материалам пар трения

Выбор материалов представляет собой трудную задачу, так как зависит от конструкции и назначения узлов, технологии производства, условий эксплуатации, от требований к общей прочности деталей, сроку их службы и надежности при учете стоимости материала и эксплуатационных расходов.

Данная пара материалов может в одних условиях быть износостойкой, а в других нет. Выбор износостойких материалов связан с видом износа. В первую очередь материалы должны гарантировать, что при заданных условиях трения на поверхности трения не возникнут недопустимые виды изнашивания, например, молекулярное схватывание, которое приводит к задирам, для допустимых форм износа материалы должны обеспечивать минимальную скорость изнашивания при данных условиях работы.

При выборе материалов пар трения помимо их высокой износостойкости к ним предъявляется и ряд требований, которые вкладываются в понятие антифрикционности материала. К таким требованиям в первую очередь относятся: легкая прирабатываемость; высокая износостойкость при нормальных условиях работы; низкий коэффи-

циент трения при нормальных условиях работы, мало изменяющийся в зависимости от скорости скольжения и времени неподвижного контакта; плавность медленных перемещений; низкий коэффициент трения и отсутствие молекулярного схватывания в условиях несовершенной смазки и при перерывах в смазке; достаточная жесткость стыка. В ряде случаев от материалов требуется также их высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, хорошая смачиваемость маслом.

Для пластмасс необходимо также обеспечивать стойкость материала при повышении температуры, стойкость к действию слабых кислот и щелочей, низкое водо- и влагопоглощение, отсутствие холодотекучести.

Материалы должны обладать хорошими технологическими свойствами. Для фрикционных материалов важную роль, помимо износостойкости, играет теплостойкость (термическая усталость), а в ряде случаев и огнебезопасность, стабильность коэффициента трения, коррозионная стойкость и теплопроводность материалов.

Необходимо иметь в виду, что реализация тех или иных свойств материалов зависит также и от конструкции и размеров пары трения, однако основой являются характеристики применяемых материалов.

При одном и том же химическом составе и механических свойствах материалы могут значительно различаться по износостойкости, что связано с различием их структур. Например, крупнозернистые сплавы более пластичны и легко прирабатываются, но они менее износостойки. Наличие легко выкрашивающихся твердых или крупных мягких составляющих, склонных к схватыванию с материалом сопряженной детали, является дефектом структуры материалов трущихся деталей.

6.3. Выбор материалов пары трения

Если известны законы изнашивания, то выбор материалов заключается в анализе влияния различных факторов на скорость изнашивания и регламентация физических параметров для получения требуемой износостойкости.

Для того чтобы правильно подобрать материалы для пары трения, необходимо следовать некоторым правилам и рекомендациям.

Так, при трении однородных материалов в условиях несовершенной смазки для предотвращения молекулярного схватывания необходимо, чтобы их твердость отличалась не менее, чем на 10 НВ.

Для антифрикционных подшипниковых сплавов широко известно правило Шарли, которое заключается в том, что сплавы должны иметь структуру, состоящую из твердых включений в пластичной массе. Типичными представителями таких сплавов являются баббиты. При определенных условиях это обеспечивает хорошую прирабатываемость материалов и высокую несущую способность.

Большое значение для получения износостойкости имеет образование на поверхности защитных окисных пленок, пленок перенесенного мягкого металла из структурных составляющих, а также нанесение на поверхность твердого материала специальных легкоплавких покрытий, менее прочных, чем основной материал.

Принцип разделения материалов трущейся пары вторичными структурами или специальными прослойками – один из основных при создании износостойких материалов.

Выбор износостойких материалов нельзя рассматривать в отрыве от смазки поверхностей. Чем надежнее смазка смачивает поверхность трения, тем большую роль в обеспечении износостойкости играют ее свойства. Поэтому применяются специальные методы нанесения рельефа на поверхность трения и специальные структуры материалов, способные удерживать и сохранять смазочный материал. Один из методов обеспечения этих качеств – применение пористых спеченных материалов методами порошковой металлургии. В узлах трения, выполненных из пористых материалов, обеспечивается самосмазывание за счет капилляров, образовавшихся между спекшимися частицами.

6.4. Правила сочетания материалов

Выбор сопряженных материалов для заданных условий работы является сложной задачей и базируется на анализе процессов, происходящих в поверхностных слоях трущихся поверхностей. Опыт эксплуатации различных машин позволяет выделить группы типовых сочетаний материалов для различных пар трения. Ниже кратко перечислены основные из них.

Сталь-антифрикционный цветной сплав. Сочетание термообработанной, например, цементированной и закаленной стали в паре с бронзами на основе олова, цинка, алюминия, свинца, а также с баббитами широко применяется для подшипников скольжения различных

типов, червячных пар, сопряжений винт-гайка и других ответственных сопряжений.

Сочетания из стали и антифрикционного материала. Сталь по стали, чугун по чугуну часто применяется при сравнительно невысоких скоростях скольжения для таких пар трения, как направляющие скольжения станков, пары трения гидросистем, гильзы цилиндра-поршневые кольца двигателей, зубчатые и цепные передачи, диски фрикционных муфт и тормозов, подшипники и направляющие качения.

Металл-полимерный материал. Такое сочетание (обычно в паре со сталью или чугуном) применяется для зубчатых и червячных передач, подшипников и направляющих скольжения, винтовых передач.

В настоящее время пары трения с полимерными материалами чаще применяются для менее ответственных механизмов, при средних нагрузках и в условиях специальных воздействий, например, в агрессивных средах (в этом случае в паре с другим полимером).

Специальная сталь-абразивная среда. Специальные хромистые, марганцовистые и другие высокопрочные стали применяются для деталей, работающих в контакте с почвой, породой, потоком газа или жидкости, таких как лемех плуга, звенья гусениц тракторов, зубья ковшей экскаваторов, лопатки турбин.

Сталь или чугун-фрикционный сплав. Для тормозных и других устройств, где требуется обеспечение значительного трения на сопряженных поверхностях, применяется сочетание специальных чугунов или сталей с металлическими, асбокаучуковыми, асбосмоляными и металлокерамическими фрикционными материалами. Применяется также сочетание сталь-серый чугун, например, при работе железнодорожных тормозных колодок. От этих материалов требуется, в первую очередь высокая теплостойкость.

Сталь-самосмазывающийся материал. Это сочетание применяется для сопряжений типа подшипников скольжения, шарниров и других деталей с ограниченной внешней смазкой и при относительно небольших скоростях скольжения, когда материал должен обеспечивать подачу смазки (жидкой или твердой) за счет своей структуры. Такими материалами могут являться пористые спеченные псевдосплавы, включающие медь, свинец, графит, а также различные типы пластмасс и металлопластмасс. Применяются также различного рода покрытия в сочетании со специальным рельефом поверхности.

При выборе материалов для узла трения следует придерживаться следующих правил.

1. Сочетать твердый материал с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения при работе. При таком сочетании металлы хорошо противостоят заданию и характеризуются высокой надежностью. Хорошие результаты дают пары хром-резина при смазывании минеральным маслом и водой и хром-бронза при использовании пластичных смазочных материалов.

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

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

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

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

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

7. Учитывать возможность при эксплуатации наводороживания поверхностей трения и надежность работы узла трения.

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

6.5. Методика подбора материалов пар трения

Триботехника к настоящему времени накопила большой опыт, позволяющий сформулировать общие принципы и методику подбора материалов для пар трения. На рисунке 6.1 представлен алгоритм выбора материала для трущихся деталей.

Рассмотрим подробнее отдельные этапы этой методики.

Анализ условий эксплуатации. На этом этапе необходимо провести анализ условий нагружения, геометрии узла трения, эксплуатационных требований, а также экономических и технологических требований.

При анализе условий нагружения и характеристики окружающей среды определяют: нагрузки и места их приложения; частоты вращения (скорости скольжения); режим нагружения (статический, динамический и т.д.); ускорения; атмосферные условия (влажность и т.д.); температуру; вид рабочей среды и ее концентрация; электрические воздействия; возможность попадания инородных частиц (абразив и т.д.).

Предварительный выбор материалов. Вначале выбирают группу материалов (черные металлы, баббиты, бронзы, полимеры и т.д.), наиболее подходящую для изготовления деталей узла трения. Затем с учетом справочных данных производят предварительный отбор материала для каждой из деталей узла трения.

Расчетно-конструктивная оценка работоспособности узла трения. Прежде всего, определяют оптимальные габариты узла трения и его конструкцию. Важным элементом геометрического расчета является установление зазоров в сопряжениях. Следует помнить, что повышенные требования к точности связаны с опасностью заклинивания при нагреве. Далее определяют нагрузочную способность детали (рассчитывают на прочность и деформацию), а затем оценивают фрикционные характеристики сопряжения (рассчитывают коэффициенты трения, определяют тепловую напряженность). И в последнюю очередь производят проверку узла трения на долговечность (рассчитывают интенсивность изнашивания). По результатам расчетов ведется конструктивная корректировка и доработка узла трения.

Окончательный выбор материала. Отобранные в результате предварительных оценок и расчетов материалы деталей пары трения

необходимо экспериментально исследовать. Вначале проводят лабораторную оценку материалов на образцах, основывающуюся на применении по возможности стандартизированных методик и оборудования, выборе схем взаимодействия образцов и режимов трения, близких к эксплуатационным. Следующий этап – испытание натуральных образцов в условиях, наиболее близко имитирующих эксплуатационные. На основании испытаний натуральных образцов решается вопрос о проведении опытно-промышленной проверки. Опытно-промышленная проверка служит основным критерием окончательного выбора материала для деталей узла трения.

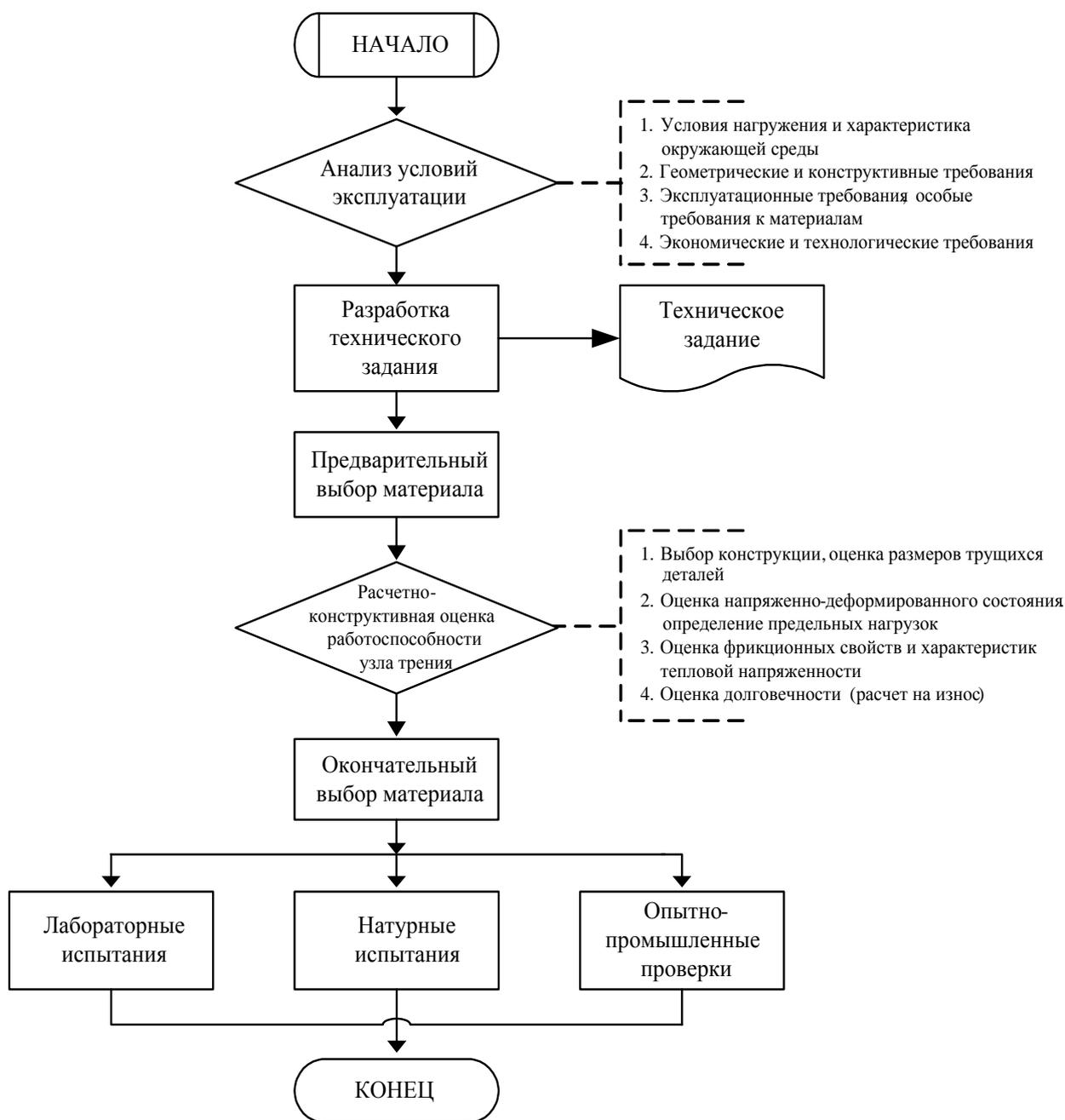


Рис. 6.1. Алгоритм выбора материалов пары трения

Контрольные вопросы к разделу 6

1. Из каких материалов изготавливают узлы трения?
2. Какие материалы называют фрикционными?
3. Какие материалы называют износостойкими?
4. Назначение фрикционных и антифрикционных материалов.

Область применения.

5. Область применения полимерных материалов.
6. От каких факторов зависит выбор материалов?
7. Требования, предъявляемые к материалам узлов трения.
8. Приведите примеры сочетания материалов узлов трения. Область применения этих пар.
9. Правила сочетания материалов.
10. В чем заключается анализ условий эксплуатации?
11. На чем основывается предварительный выбор материалов?
12. Что включает в себя расчетно-конструктивная оценка работоспособности узла трения?
13. В чем заключается окончательный выбор материалов?

7. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ

7.1. Конструкторские способы повышения износостойкости

Конструкторские способы повышения долговечности и надежности трущихся деталей достаточно разнообразны и решаются на стадии проектирования узлов трения.

На рисунке 7.1 приведены основные конструкторские способы улучшения условий трения.



Рис. 7.1. Конструкторские способы улучшения условий трения

Основными задачами при конструировании узла трения являются:

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

7.1.1. Оценка и выбор схемы узла трения

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

$$H_1 > H_2 \text{ и } S_1 < S_2, \quad (7.1)$$

$$H_1 < H_2 \text{ и } S_1 > S_2. \quad (7.2)$$

где H_1, H_2 – твердости поверхностей трения;
 S_1, S_2 – площади поверхностей, мм².

Пару с расположением материалов, удовлетворяющим условию (7.1), называют прямой парой трения, а удовлетворяющим условию (7.2) – обратной. В случае прямой пары трения по большей поверхности скользит более твердое тело, а в случае обратной пары – более мягкое. Примерами прямой пары является скольжение закаленного суппорта по чугунной термически необработанной станине и скольжение хромированного поршневого кольца по поверхности цилиндра из перлитного чугуна. Обратной парой будет хромированное рабочее зеркало цилиндра и чугунное кольцо.

Чтобы определить, какая пара трения (прямая или обратная) предпочтительнее для данной конструкции, следует установить требования к паре в отношении надежности ее работы, износостойкости, экономичности и условий эксплуатации.

Недостаточная надежность пары трения в связи с неподходящим подбором материалов может выразиться в схватывании и заедании. Опыт эксплуатации машин, стендовые испытания трущихся деталей и лабораторные исследования показывают, что обратные пары трения более стойки к заеданию, а при наличии заедания имеют меньшие повреждения поверхностей.

Различие в работе прямых и обратных пар трения состоит в следующем. В прямой паре при перегрузке пластическая деформация ее элемента с меньшей твердостью препятствует нормальной работе пары, в результате чего возрастают силы трения, увеличивается повреждение поверхности, пара быстро выходит из строя. В обратной паре при перегрузке пластическая деформация образца с меньшей твердостью не препятствует работе пары.

На долговечность и надежность работы узлов трения благоприятное влияние оказывают жесткость, податливость и специальная конфигурация деталей. Увеличение жесткости конструкции способствует повышению износостойкости. Чем равномернее распределена нагрузка по длине зуба зубчатых передач, тем выше их нагрузочная способность. Неточность изготовления и сборки деталей передачи, изгиб и кручение валов в процессе работы способствуют неравномерному распределению нагрузки. Поэтому увеличение жесткости валов, опор и корпусов является благоприятным фактором в повышении работоспособности изделий.

7.1.2. Замена внешнего трения внутренним трением упругого элемента

Кинематические пары с жесткими звеньями для относительно небольших линейных, угловых или совместных перемещений в ряде случаев могут быть заменены неподвижными соединениями с промежуточным элементом высокой упругости, что имеет ряд преимуществ. Взаимное смещение звеньев в процессе их работы достигается за счет деформации специальной эластичной детали; при этом внешнее трение скольжения или качения заменяется внутренним трением упругого элемента из резины. Это соединение выполняется в виде резинометаллического шарнира.

По способу изготовления различают шарниры, вулканизованные в сборе, закатанные и сборные. Закатанные шарниры встречаются только в виде резинометаллических.

Резинометаллические шарниры нашли применение в узлах подвески автомобилей и тракторов, в мягких карданах, в гусеницах тягачей, сочленениях вагонных и локомотивных рам с их поворотными тележками и т.п.

По сравнению с обычными шарнирами резинометаллические имеют следующие преимущества: отсутствует изнашивание от внеш-

него трения; отсутствие смазочного материала и уплотняющих устройств; упрощается обслуживание; уменьшается масса; амортизация ударов; гашение вибраций и демпфирование крутильных колебаний.

Отсутствие смазочного материала в шарнирах имеет особое значение для машин пищевой и текстильной промышленности.

7.1.3. Замена трения скольжения трением качения

Замена трения скольжения трением качения способствует повышению долговечности деталей, надежности их работы и экономичности машин.

Для узлов, работающих в условиях трения качения, характерны следующие преимущества.

1. Малые потери на трение и более высокий КПД. Низкий коэффициент трения. Коэффициент трения качения сравнительно мало изменяется в большом диапазоне нагрузок и окружных скоростей.

2. Возможность экономичного использования цветных металлов (медь, олово и т.д.), что способствует снижению стоимости узла.

3. Небольшой расход смазочных материалов.

4. Отсутствие необходимости в принудительном охлаждении.

5. Высокая степень стандартизации, упрощающая конструирование и монтаж узлов.

6. Возможность восприятия осевых нагрузок.

7.1.4. Выбор зазоров в сопряжениях

При работе трущиеся детали нагреваются, претерпевают тепловые деформации, что приводит к изменению формы и величины зазоров и натягов в сопряжениях.

Учет температурных деформаций при конструировании деталей узлов трения и компоновке машины сводится к правильному назначению зазоров в сопряжении и разработке мер для возможно меньшего искажения конфигурации поверхностей трения в рабочем состоянии.

Независимо от того, работает подшипник в режиме полусухого или жидкостного трения, между валом и вкладышем подшипника должен быть предусмотрен зазор для образования масляной пленки. Величины этих зазоров принимаются по ГОСТу для подвижных посадок 6-го и 7-го квалитетов точности. Минимальные диаметральные зазоры зависят от диаметра цапфы.

7.1.5. Защита рабочих поверхностей от загрязнений

Многие машины и механизмы работают в запыленной или загрязненной среде, что приводит к попаданию в узлы трения абразивных частиц. Поэтому обеспечение хорошей защиты поверхностей трения от загрязнений является важным средством обеспечения долговечности и работоспособности деталей и узлов трения.

Способы защиты поверхностей трения от загрязнений определяются назначением механизма или машины, конструкцией узла, условиями эксплуатации, требованиями к кинематической точности и другими факторами. Защиту от загрязнений можно подразделить на группы: защита открытых узлов трения; герметизация закрытых корпусов в местах выхода валов или других подвижных деталей; очистка смазочного материала; удаление загрязнений из топлива, воздуха, а также газов и жидкостей, поступающих во внутренние полости машины.

Защита от загрязнений осуществляется с помощью различных систем масляных и воздушных фильтров, которые обеспечивают очистку масла и воздуха, поступающих к поверхностям трения. Также используют различные уплотнительные устройства – совокупность деталей, образующих конструкцию, предназначенную для герметизации узла трения, с целью предотвращения утечки смазочного материала и защиты от проникновения извне абразивных частиц.

Защита шарнирных соединений осуществляется с помощью различных кожухов и чехлов из водонепроницаемых материалов.

Уплотнительные устройства делятся на две большие группы: подвижные и неподвижные (рис. 7.2).

На работоспособность любого уплотнительного устройства оказывают влияние многочисленные и разнообразные по своей природе факторы, которые часто взаимосвязаны между собой.

Так, на работоспособность уплотнительных устройств оказывают влияние:

- режим работы (ресурс, температура, нагрузка, скорость скольжения, условия хранения и транспортировки, наличие вибраций конструкции, пульсаций рабочих параметров и др.);
- свойства герметизируемой среды (температуры замерзания и кипения, теплофизические свойства, химическая активность, вязкость и зависимость ее от температуры и давления, особенности поведения в узких зазорах и т.д.);

- свойства материалов сопряженных деталей и их покрытий (прочностные, усталостные, релаксационные, теплофизические и др.);
- технология изготовления и сборки уплотнений (способ и характер обработки поверхностей, точность изготовления и т.д.).

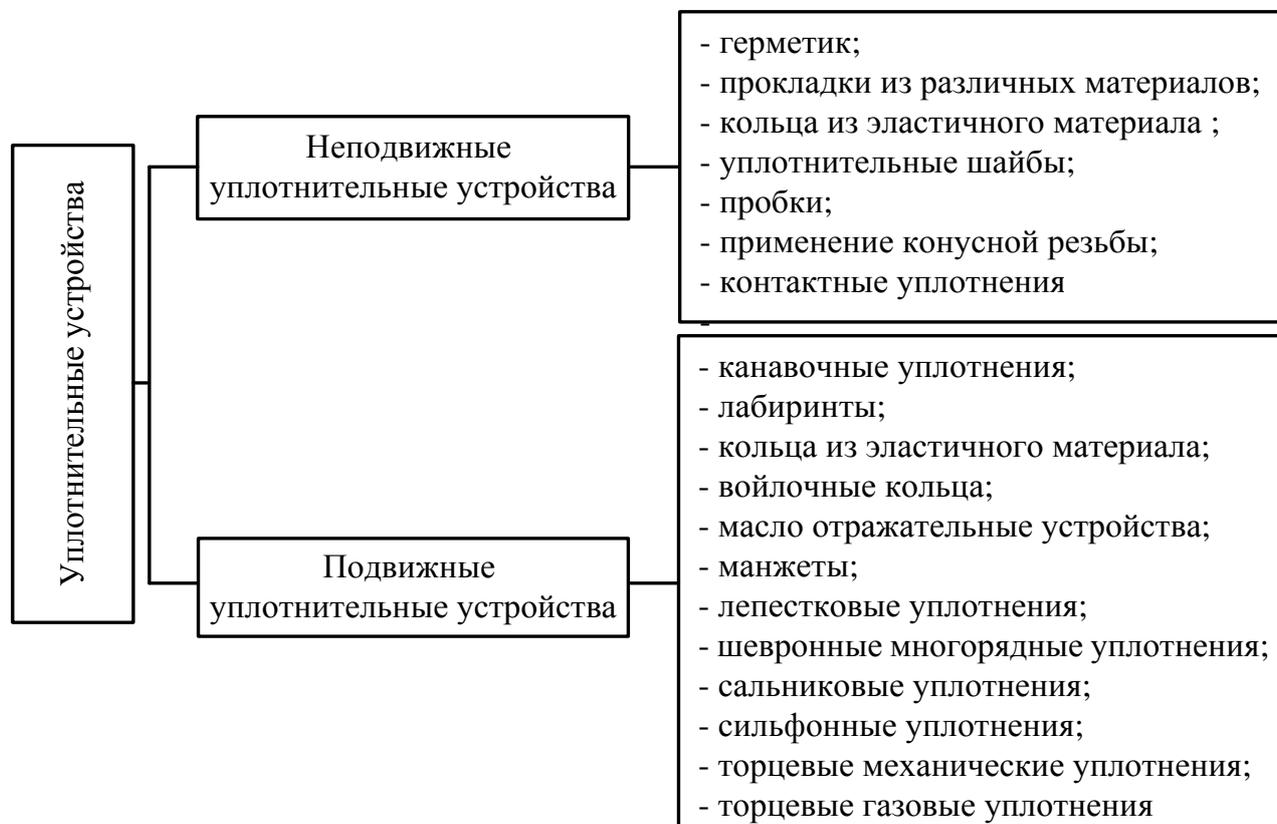


Рис. 7.2. Типы уплотнительных устройств

Перечисленные выше факторы необходимо учитывать при выборе уплотнительного устройства на стадии конструирования узлов трения.

7.2. Технологические методы обеспечения износостойкости узлов трения

Существующие технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей деталей узлов трения подразделяют на несколько групп: механические, химико-термические, нанесение износостойких покрытий, наплавка и др. Применение этих методов вызвано стремлением повысить эксплуатационные качества деталей машин. Технологические методы повышения долговечности и износостойкости трущихся деталей приведены на рисунке 7.3.

Рассмотрим некоторые основные технологические методы.



Рис. 7.3. Технологические методы повышения износостойкости узлов трения

7.2.1. Обработка резанием

Процесс резания – сложный физический процесс, сопровождающийся большим тепловыделением, деформацией металла, изнашиванием режущего инструмента и наростообразованием на резце. В зависимости от метода обработки изменяется расположение и форма неровностей. Направление неровностей влияет на износостойкость поверхности, определенность посадок, прочность прессовых соединений. Например, при совпадении направления скольжения с направлением неровностей обеих деталей происходит снижение изнашивания. На рисунке 7.4 представлены некоторые виды расположения неровностей в зависимости от способа обработки. Типы расположения неровностей регламентирует ГОСТ 2789-73.

Под действием режущего инструмента срезаемый слой металла подвергается сжатию. Процессы сжатия (как и процессы растяжения) сопровождаются упругими и пластическими деформациями. Режущий инструмент деформирует не только срезаемый слой, но и поверхностный слой обрабатываемого материала.

Под действием деформации поверхностный слой упрочняется, увеличивается его твердость и уменьшается пластичность, происходит наклеп обрабатываемой поверхности. Этот вид упрочнения поверхностного слоя характеризуется тремя показателями: глубиной, степенью и градиентом.

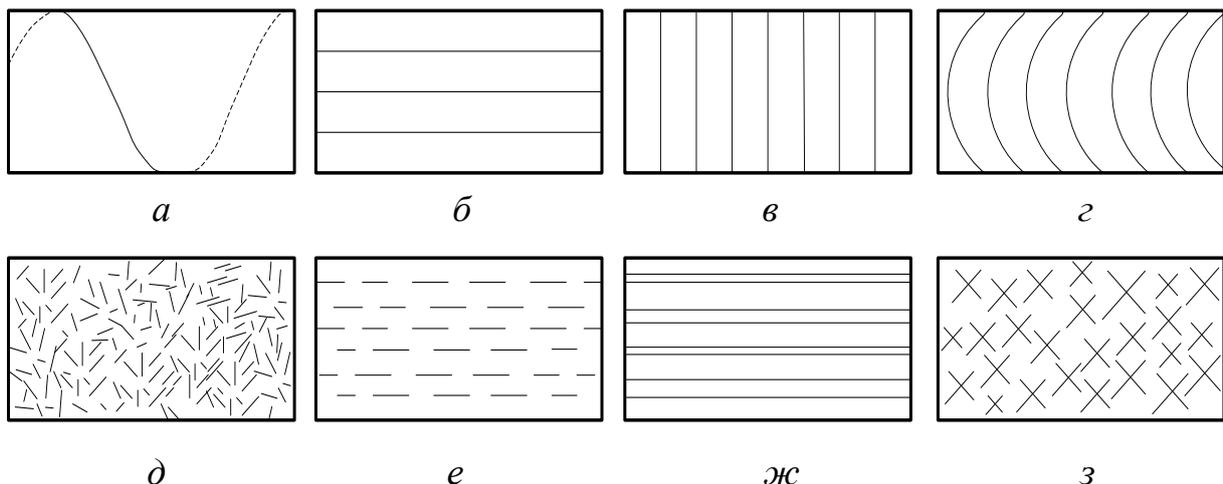


Рис. 7.4. Расположение неровностей: а – точение, растачивание, сверление, зенкерование, развертывание; б – строгание; в – цилиндрическое резерование; г – торцовое фрезерование; д – доводка свободным абразивом; е – шлифование; ж – протягивание; з – суперфиниширование

В результате деформационного упрочнения поверхностного слоя микротвердость его возрастает по сравнению с исходной: у алюминия на 90...100 %; латуни – 60...70 %; мягкой конструкционной стали на 40...50 %; твердой конструкционной стали на 20...30 %. Глубина деформации поверхностного слоя зависит от различных факторов и может достигать от сотых долей до нескольких миллиметров. Например, глубина наклепанного слоя у сталей средней твердости составляет при черновой обработке резцом 0,4...0,5 мм, чистовой обработке резцом – 0,07...0,09, шлифовании – 0,04...0,06, полировании 0,02...0,04 мм. Чем мягче и пластичнее обрабатываемый металл, тем большему наклепу он подвергается. Например, стали аустенитного класса наклепываются значительно сильнее, чем конструкционные. Чугуны обладают значительно меньшей способностью к упрочнению, чем стали.

На степень упрочнения и глубину наклепа оказывают влияние режимы резания, геометрия режущего инструмента, степень его затупления, т.е. факторы, определяющие протекание пластической деформации в зоне резания.

Увеличение скорости резания способствует уменьшению глубины и степени наклепа, а подачи и глубины резания – их увеличению. Глубина наклепа примерно в 2...3 раза больше при работе затупленным режущим инструментом, чем при работе острозаточенным.

Смазочно-охлаждающие жидкости при резании уменьшают глубину и степень упрочнения поверхностного слоя.

Кроме перечисленных выше факторов на наклеп влияет изменение переднего и заднего углов (изменение характеристик наклепа на 20 %). Увеличение износа инструментов, особенно задней поверхности, вызывает значительное увеличение глубины наклепанного слоя (на 200...250 %), степень наклепа при этом увеличивается в 1,3...2 раза.

7.2.2. Обработка поверхности пластическим деформированием

Для повышения долговечности и износостойкости узлов трения различного назначения широко используются *методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД)*.

Упрочнение выполняется с целью повышения сопротивления усталости и твердости поверхностного слоя металла и формирования в поверхностном слое напряжений сжатия, а также регламентированного микрорельефа.

Упрочняющую обработку ППД применяют на финишных операциях технологического процесса, вместо или после термообработки, и часто вместо абразивной или отделочной обработки.

В зависимости от назначения метода и пластических деформаций обработку ППД можно разделить на три класса.

1. Отделочно-упрочняющая обработка ППД (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, виброобработка, динамическое упрочнение, электромеханическая и комбинированная обработка различных поверхностей деталей машин).

2. Формообразующая ППД (накатывание зубьев, шлицев, резьб, фасонных поверхностей).

3. Отделочно-упрочняющая обработка ППД (калибрование наружных и внутренних поверхностей вращения и дорнование).

Как описывалось выше, ППД, выполняемое без использования внешнего тепла и обеспечивающее создание поверхностного слоя с заданным комплексом свойств, называют наклепом. В результате наклепа повышаются характеристики сопротивления металла деформации, понижается пластичность и увеличивается твердость.

Упрочнение незакаленной стали происходит за счет структурных изменений и изменений структурных несовершенств (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.), дроблением блоков и наведением микронапряжений. При упрочнении закаленных сталей, кроме этого, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц. Поверхностная деформация приводит к образованию сдвигов в зернах, упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен.

7.2.3. Термическая обработка

Термической обработкой называют процессы, связанные с нагревом и охлаждением металла, находящегося в твердом состоянии, с целью изменения структуры и свойств без изменения его химического состава. Термическую обработку характеризуют основные параметры: нагрев до определенной температуры, выдержка при этой температуре, а также скорость нагрева и скорость охлаждения.

В зависимости от температурных режимов термическая обработка подразделяется на следующие виды: отжиг, нормализация, закалка, отпуск, химико-термическая обработка (ХТО), термомеханическая обработка (ТМО).

Отжиг и нормализация. Отжиг заключается в нагреве стали выше критической температуры, выдержке при данной температуре и медленном охлаждении (обычно вместе с печью). В зависимости от требований, предъявляемых к свойствам стали, различают следующие виды отжига: диффузионный, полный, неполный. Отжиг способствует снижению внутренних напряжений; измельчению зерна; придает стали пластичность перед последующей обработкой; приводит структуру в равновесное состояние.

При изотермическом отжиге конструкционную сталь нагревают до температуры на 30...50°C выше верхней критической точки (для полного превращения структуры стали в аустенит) и последующем медленном охлаждении до 500...600°C (для образования феррита и перлита). Скорость охлаждения для углеродистых сталей около 50...100 °C/ч. Если охлаждение ведется на воздухе, то происходит нормализация.

Нормализацией стали называется нагрев, выдержка и последующее охлаждение на воздухе. После нормализации углеродистые стали имеют исходную структуру. Нормализация применяется для устранения крупнозернистой структуры, выравнивания механических свойств. После нормализации твердость и прочность стали будут выше, чем при отжиге.

Закалка и отпуск. Наиболее распространенным видом упрочняющей термической обработки средне- и высокоуглеродистых сталей является закалка с последующим отпуском. Поверхностная закалка применяется с целью получения высокой твердости в поверхностном слое детали с сохранением вязкой сердцевины. Она состоит из двух операций: нагрева поверхностного слоя и быстрого его охлаждения.

При закалке в качестве охлаждающей среды чаще всего используют воду, иногда с добавками солей, щелочей. Для увеличения охлаждающей способности применяют также масла, расплавленные соли и металлы. По способу нагрева различают следующие методы поверхностной закалки: высокочастотная, контактная, плазменная, при нагреве в электролите, лазерная.

Газоплазменная закалка заключается в нагреве поверхности стальных изделий ацетиленокислородным пламенем, температура которого составляет 2400...3150°C. При этом поверхность изделия быстро нагревается до температуры закалки, а сердцевина не успевает нагреться. Быстрое охлаждение обеспечивает закалку поверхностного

слоя. Толщина закаленного слоя 2...4 мм, твердость достигает HRC 50...56.

Индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ) наиболее распространенный производительный и прогрессивный метод поверхностного упрочнения. Преимуществом его является возможность автоматизации процесса, отсутствие выгорания углерода и других элементов, а также окисления поверхности изделия. Сущность способа состоит в том, что под действием электродвижущей силы (ЭДС) в металле возникают электрические вихревые токи (токи Фуко), которые нагревают металл до нужной температуры.

Твердость поверхностного слоя при нагреве ТВЧ несколько выше, чем твердость получаемая при обычной закалке. Закалку с использованием ТВЧ применяют для сталей с содержанием углерода более 0,4 %, чтобы получить заданную твердость.

В последнее время также применяется поверхностная обработка с использованием нагрева лазером. Этот вид закалки отличается высокой эффективностью. Лазерное излучение в инфракрасном диапазоне, сфокусированное в пятно диаметром порядка десятка микрометров, совершает пилообразное движение (сканирование) по поверхности детали, покрывая весь выделенный под закалку участок. Скорость нагрева микрообъемов детали, взаимодействующих с лучом, и последующего охлаждения достигает 10⁶ К/с. Это обеспечивает закалку поверхностного слоя, глубина которого регулируется за счет изменения скорости сканирования. Лазерная закалка обеспечивает получение однородной мелкокристаллической поверхностной структуры, обладающей повышенной твердостью и износостойкостью. После термообработки лазерным лучом не происходит коробление элементов рельефа детали, не наблюдается заметное ухудшение качества поверхности. Из-за высокой стоимости процесса лазерной закалке подвергаются самые дорогостоящие и ответственные детали, например, коленвалы двигателей внутреннего сгорания.

Эффективным методом повышения износостойкости деталей является лазерное легирование с одновременной закалкой поверхностного слоя. Поверхность, подлежащая обработке, покрывается тонким слоем вещества, содержащего легирующие элементы. В процессе плавления легирующие элементы внедряются в кристаллическую решетку материала детали, тем самым повышая ее износостойкость.

К основным дефектам закалки относятся: недогрев, перегрев, пережог, обезуглероживание, коробление, трещины и др.

Закалка стали сопровождается увеличением ее объема, что приводит к значительным внутренним напряжениям, которые являются причиной образования трещин и коробления. Трещины являются неисправимым дефектом, а коробление можно устранить последующей рихтовкой или правкой. По указанным выше причинам закаленные изделия и инструмент подвергают отпуску.

Отпуск заключается в нагреве стали до заданной температуры, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение с заданной скоростью. Цель отпуска – уменьшение закалочных напряжений, снижение твердости и получение необходимых механических свойств.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска.

Низкий отпуск производится при температуре плюс 120...150°С (отпуск на отпущенный мартенсит). Его применяют после закалки инструментов, цементованных и цианированных изделий, а также после поверхностной закалки. При низком отпуске уменьшаются остаточные закалочные напряжения, твердость практически не снижается.

Средний отпуск (отпуск на троостит происходит при нагреве до температур 350...450°С). При этом снижается твердость. Средний отпуск рекомендуется для пружин и рессор.

Высокий отпуск (отпуск на сорбит) производится при температуре 500...650°С. Применяют в машиностроении для изделий из конструкционной стали с целью обеспечения достаточной прочности, вязкости и пластичности. Сочетание закалки с высоким отпуском на сорбит называется улучшением. Эту операцию применяют для среднеуглеродистых сталей (0,35...0,6 % С).

7.2.4. Термомеханическая обработка стали

Термомеханическая обработка – это совокупность операций пластической деформации и термической обработки, совмещенных в одном технологическом процессе, который включает нагрев, пластическое деформирование и охлаждение. Термомеханическое воздействие приводит к получению структурного состояния, которое обеспечивает повышение механических свойств.

Оптимальное сочетание пластической деформации и фазовых превращений приводит к повышению плотности и более правильному расположению несовершенств кристаллической решетки металла.

Различают два основных вида ТМО: высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) и низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

При ВТМО деформация производится при температуре выше температуры рекристаллизации. Степень деформации 20...30 %. Во избежание рекристаллизации вслед за деформацией незамедлительно производится закалка (1150°С) с последующим низкотемпературным отпуском (100...200°С).

НТМО применяется только для легированных сталей, обладающих значительной устойчивостью переохлажденного аустенита. При НТМО деформация производится ниже температуры рекристаллизации (400...600°С), степень деформации 75...95 %. Закалку производят сразу после деформации, а затем следует низкотемпературный отпуск (100...200°С).

Недостатками НТМО являются, во-первых, необходимость использования мощного оборудования для деформирования, во-вторых, стали после НТМО имеют невысокую сопротивляемость хрупкому разрушению.

Если при обычной термической обработке сталь имеет временное сопротивление при растяжении 2000...2200 МПа, то после ТМО оно достигает 2200...3000 МПа, при этом пластичность увеличивается в два раза (удлинение с 3...4 % повышается до 6...8 %).

7.2.5. Химико-термическая обработка

Химико-термической обработкой (ХТО) называется процесс поверхностного насыщения стали различными элементами с целью придания ей соответствующих свойств. Химико-термическая обработка получила наибольшее распространение как метод упрочнения поверхностей из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Она отличается от других видов термической обработки тем, что при этой обработке кроме структурных изменений происходят изменения состава и строения поверхности за счет диффузии в нее элементов в атомарном состоянии из внешней среды при высоких температурах. Основная цель – упрочнение поверхности деталей, повышение твердости, износостойкости, усталостной прочности и повышение стойкости против воздействия агрессивных сред. Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм.

К процессам ХТО относятся цементация, азотирование, цианирование, алитирование, хромирование, силицирование, борирование и др.

ХТО характеризуется тремя одновременно протекающими процессами. Первый процесс – диссоциация – заключается в распаде молекул и образовании диффундирующего элемента в атомарном состоянии. Второй процесс, называемый абсорбцией, представляет собой взаимодействие атомов диффундирующего элемента с поверхностью изделия и проникновение их в решетку железа. Третий процесс – диффузия – заключается в проникновении атомов насыщенного элемента в глубь металла.

Рассмотрим кратко некоторые виды ХТО.

Цементация – процесс насыщения поверхности изделия углеродом. Цель цементации – придание поверхности твердости при сохранении мягкой сердцевины. Обычно цементации подвергают детали из низкоуглеродистой стали, содержащей не более 0,25 % С (сталь марок 10, 15, 20, А 12, 15Х, 25ХГМ и др.), работающие в условиях переменных ударных нагрузок и подвергающиеся износу, например, зубья зубчатых колес, шестерни, втулки, поршневые пальцы и т.д. Цементация осуществляется в твердом (древесный уголь), жидком (расплавы солей) и газообразном (углеводороды) карбюризаторах. Температура цементации 900...970°С. Толщина цементованного слоя от 0,1 до 3...4 мм. Процесс протекает медленно: скорость науглероживания порядка 0,1 мм/ч. Однако, если повысить температуру до 950...980°С, процесс существенно ускоряется. Наиболее эффективна газовая цементация с нагревом детали токами высокой частоты.

Азотирование – процесс насыщения стали азотом. Цель азотирования – придать поверхности высокую твердость, износостойкость, устойчивость против коррозии и усталостную прочность. Процесс заключается в воздействии на сталь аммиака (газовое азотирование) при температуре 500...600°С. Легирующие элементы, входящие в состав стали (Cr, Mo, V, Al), образуют с азотом стойкие нитриды, обладающие высокой твердостью (до HRC 70). Азотированный слой сохраняет свою твердость до 400...600°С, в то время как твердость цементованного слоя с мартенситной структурой сохраняется лишь до 200...250°С. Толщина азотированного слоя 0,25...0,75 мм. Азотированию подвергают коленвалы, цилиндры, поршневые кольца, седла клапанов, зубья шестерен. Недостатком метода является увеличение деталей в размере и коробление. Поэтому азотированные элементы

деталей подвергают окончательной обработке в виде полирования или шлифования.

Цианирование – насыщение поверхности изделий одновременно углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях при температуре 820...950°C.

Различают низкотемпературное и высокотемпературное цианирование. При низкотемпературном цианировании детали нагревают до 820...860°C в расплавленных солях, содержащих CaCN_2 , в течение 0,5...1,5 ч, при этом получают слой толщиной 150...350 мкм. Затем производят закалку с последующим низкотемпературным отпуском (180...200°C). Твердость после термической обработки составляет HRC 58...62. Такой обработке обычно подвергают детали из среднеуглеродистых сталей и инструменты из быстрорежущих сталей.

Для получения более толстого слоя (500...2000 мкм) применяют высокотемпературное цианирование при 930...950°C со временем выдержки 1,5...6 ч. После такой обработки детали охлаждают на воздухе, производят закалку и низкотемпературный отпуск.

Цианированию подвергаются ответственные резьбовые соединения, втулки, зубчатые колеса, вилки механизма коробки передач, ролики, кулачковые пары. Преимущество цианирования перед цементированием и азотированием – большая скорость процесса и более высокий упрочняющий эффект. Недостатком этого процесса является токсичность цианистых солей, что вызывает необходимость проводить работу в специальном помещении с соблюдением мер безопасности.

Нитроцементация представляет собой процесс насыщения поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом в газовой среде азота (40 %), водорода (40 %) и оксида углерода (20 %) при температуре 850...870 °C в течение 4...10 ч. Назначение – повышение износостойкости, предела выносливости при изгибе, твердости и коррозионной стойкости. После закалки и низкого отпуска (160...180°C) твердость поверхностного слоя составляет HRC 58...60 и толщина слоя 0,2...0,8 мм. Твердость и толщина поверхностного слоя зависят от температуры и времени выдержки.

Нитроцементацию широко используют в автомобильном и тракторном производстве. Нитроцементация имеет определенные преимущества по сравнению с газовой цементацией – более низкая температура процесса, снижение деформации и коробления и др.

Борирование заключается в насыщении поверхностного слоя изделий из низко- и среднеуглеродистых сталей (20, 40, 40X, 30XГС

и др.) бором при нагревании в боросодержащей среде. Борирование применяют для повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и окалинстойкости тяжело нагруженных деталей (нефтяное оборудование, штампы, пресс-формы и др.). Процесс проводится при температуре 850...950°С в течение 2...6 ч. Поверхностный слой состоит из боридов, толщина слоя 0,1...0,2 мм, твердость его HV 1800...2000.

7.2.6. Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхности стальных деталей металлами с целью придания их поверхности жаростойкости, коррозионной стойкости, твердости, износостойкости и др. Диффузионная металлизация может осуществляться в твердых, жидких и газообразных средах. Для твердой диффузионной металлизации используют ферросплавы с добавлением хлористого аммиака (0,5...5 %). Жидкую диффузионную металлизацию проводят, погружая детали в расплавленный металл (Al, Cr и др.). Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах – хлоридах различных металлов. Поверхностное насыщение проводится при температурах 900...1200 °С.

Рассмотрим кратко наиболее часто применяемые процессы диффузионной металлизации.

Силицирование – термодиффузионное насыщение поверхности изделия кремнием с целью повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, износостойкости и кислотостойкости материалов в агрессивных жидких и газовых средах. Силицирование применяют, например, для гнезд клапанов, вкладышей подшипников, роторов водяных насосов, рубашек цилиндров, трубопроводной арматуры, труб судовых механизмов и др.

Алитирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали алюминием для повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости сталей, чугунов и медных сплавов. Алитирование осуществляют в порошкообразных смесях, ваннах с расплавленным алюминием, газовой среде и распылением жидкого алюминия. Наибольшее распространение получило алитирование в порошках с насыщением из газовой фазы. На поверхности образуется плотная пленка оксида алюминия (Al_2O_3), предохраняющая поверхность от

окисления. Алитирование производят при 950...1050°C в течение 3...12 ч. Толщина слоя составляет в среднем 0,2...0,8 мм.

Хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали хромом, при этом повышается коррозионная стойкость, твердость и износостойкость. Наибольшее применение получило хромирование в порошкообразных смесях феррохрома или хрома, хлористого аммония и оксида алюминия. Хромирование производится при 1000...1050°C в течение 6...12 ч. Толщина получаемого слоя не более 0,2 мм. Хромируют обычно низкоуглеродистые стали. Хромированию подвергают клапаны компрессоров, матрицы штампов для холодной высадки и др.

Никелирование – обработка поверхности изделий путем нанесения на них никелевого покрытия. Толщина наносимого покрытия обычно составляет от 1 до 50 мкм. Как правило, никелированием обрабатывают металлические изделия, изготовленные из стали либо других металлов и сплавов, в частности, меди, цинка, алюминия, реже марганца, титана, вольфрама или молибдена. Кроме того, существуют методы никелирования неметаллических поверхностей – полимерных, керамических и т.д.

Никелирование применяется для повышения износостойкости, восстановления размеров изношенных деталей (до 1,25 мм). При трении без смазки износостойкость никелевого покрытия в 2...3 раза выше, чем у закаленной стали, на 10...20 % ниже, чем хромированной поверхности. Никелирование защищает изделия от коррозии в атмосфере, растворах щелочей и солей, а также слабых органических кислот. Наиболее распространены электролитическое (гальваническое) и химическое никелирование.

Оксидирование – создание оксидной пленки на поверхности изделия или заготовки в результате окислительно-восстановительной реакции. Оксидирование преимущественно используют для получения защитных и декоративных покрытий, а также для формирования диэлектрических слоев. Различают термические, химические, электрохимические (или анодные) и плазменные методы оксидирования.

Железнение – процесс электролитического осаждения железа из водных растворов его закисных солей. Железо осаждают на катоде; анодом служат прутки или полосы малоуглеродистой стали.

Электролитически осажденное железо отличается высокой химической чистотой, благодаря чему его коррозионная стойкость выше, чем у малоуглеродистой стали. По структуре состоит из вытянутых по

направлению к покрываемой поверхности зерен. Предел прочности 350...450 МПа, относительное удлинение 5...10 %, твердость НВ 100...240 (в зависимости от состава электролита и условий электролиза). Толщина слоя может достигать 8 мм. Если необходима более высокая твердость, например, при восстановлении цементованных изделий, то прибегают к хромированию или цементации покрытия.

Железнение применяется как средство наращивания металла на изношенную поверхность стальных и чугуновых деталей при восстановлении их размеров. Для получения износостойких покрытий с повышенными механическими свойствами и улучшенной структурой железнение проводят в электролитах, содержащих марганец или никель.

7.2.7. Напыление поверхностей

Газотермическое напыление (ГТН) – это процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя нужного материала. ГТН объединяет следующие методы: газопламенное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление, детонационное напыление, плазменное напыление, напыление с оплавлением, электродуговая металлизация и активированная электродуговая металлизация.

Как правило, ГТН применяют для создания на поверхности деталей и оборудования функциональных покрытий – износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных, антизадирных, теплостойких, термобарьерных, электроизоляционных, электропроводных и т.д. Материалами для напыления служат порошки, шнуры и проволоки из металлов, металлокерамики и керамики. Некоторые из методов газотермического напыления являются альтернативой методам гальванической, химико-термической обработки металлов, плакирования, другие – методам покраски, полимерным покрытиям. Другое распространенное применение ГТН – ремонт и восстановление деталей и оборудования. С помощью напыления можно восстановить от десятков микрон до миллиметров металла.

Метод ГТН обладает следующими особенностями:

- возможность нанесения покрытий из различных материалов (практически любой плавящийся материал, который можно подать как порошок или проволоку);
- отсутствие перемешивания материала основы и материала покрытия;

- невысокий (не более 150 °С) нагрев поверхности при нанесении покрытия;

- возможность нанесения нескольких слоев, каждый из которых несет свою функцию (например, коррозионно-стойкий плюс термобарьерный);

- легкость обеспечения защиты окружающей среды при нанесении (использование воздушных фильтров).

Высокоскоростное газопламенное напыление широко применяется для создания плотных металлических и металлокерамических покрытий.

Детонационное напыление в силу дисперсного характера напыления и малой производительности наиболее подходит для напыления покрытий для защиты и восстановления небольших участков.

Распыление с помощью плазмы обычно называют *плазменным напылением*. Этот метод весьма энергозатратный, наиболее оправдано его применение для создания керамических покрытий.

Электродуговая металлизация энергетически более выгодна, однако, позволяет напылять только металлические материалы. Как правило, используется для напыления антикоррозионных металлических покрытий на больших площадях.

Газопламенное напыление – недорогой во внедрении и эксплуатации метод, широко используемый для восстановления геометрии деталей.

Напыление с оплавлением – метод, обеспечивающий металлургическую связь покрытия с основой. Применяется, если высокий нагрев при оплавлении не ведет к риску термических повреждений детали.

7.2.8. Наплавка поверхностей

Наплавка – это нанесение слоя металла или сплава на поверхность изделия посредством сварки плавлением. Наплавку производят при восстановлении изношенных и при изготовлении новых деталей машин и механизмов.

Восстановительная наплавка применяется для получения первоначальных размеров изношенных или поврежденных деталей. В этом случае наплавленный металл близок по составу и механическим свойствам основному металлу. Восстановлению подлежат корпусные детали различных двигателей внутреннего сгорания, распределительные и коленчатые валы, клапаны, шкивы, маховики, ступицы колес и т.д.

Наплавка функциональных покрытий служит для получения на поверхности изделий слоя с необходимыми свойствами. Основной металл обеспечивает необходимую конструкционную прочность. Слой наплавленного металла придает детали особые заданные свойства: износостойкость, жаростойкость, жаропрочность, коррозионную стойкость и т.д. Увеличивается твердость поверхности.

Наплавка подразделяется на следующие способы:

- ручная дуговая наплавка покрытыми электродами;
- дуговая наплавка под флюсом проволоками и лентами;
- дуговая наплавка в защитных газах вольфрамовыми (неплавящимся) и проволочными металлическими (плавящимися) электродами;
- дуговая наплавка самозащитными порошковыми проволоками;
- электрошлаковая наплавка;
- плазменная наплавка;
- лазерная наплавка;
- электронно-лучевая наплавка;
- индукционная наплавка;
- газопламенная наплавка.

Наплавку производят при восстановлении изношенных и при изготовлении новых деталей машин и механизмов.

Наименьшая толщина наплавленного слоя – 0,25 мм, наибольшая – не ограничена. При наплавке есть опасность появления трещин. Во избежание образования трещин применяют предварительный нагрев и сохранение постоянной температуры в процессе наплавки: чем выше склонность к трещинообразованию, тем выше температура подогрева. По окончании процесса обеспечивают плавное охлаждение. Наплавленный металл имеет структуру литого металла и упрочняется накатыванием.

7.2.9. Финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей

Финишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО) используют для повышения износостойкости деталей. Ее сущность заключается в том, что поверхности трения деталей покрывают тонким слоем (1...3 мкм) бронзы, латуни или меди, вследствие чего они приобретают высокие антифрикционные свойства и контактную жесткость. При этом используют явление переноса металла при трении. Обрабатываемую поверхность обезжиривают. Покрыва-

ют раствором (глицерин или смесь 2 частей глицерина и 1 части 10 %-го раствора соляной кислоты), который в процессе трения разрыхляет оксидную пленку на поверхности стальной детали, создает условия для схватывания медного сплава со сталью. После этого поверхность натирают прутками меди, латуни, бронзы с помощью приспособления на станках. При трении материал прутка (инструмента) переносится на стальную или чугунную поверхность детали.

Толщина антифрикционного слоя латуни на стали при ФАБО 2...3 мкм, бронзы и меди – 1...2 мкм. В результате этой технологической операции коэффициент трения снижается в 1,5 раза, износостойкость повышается в 2...3 раза. Шероховатость поверхности деталей после ФАБО практически не отличается от исходной.

Схема финишной антифрикционной безабразивной обработки деталей показана на рисунке 7.5.

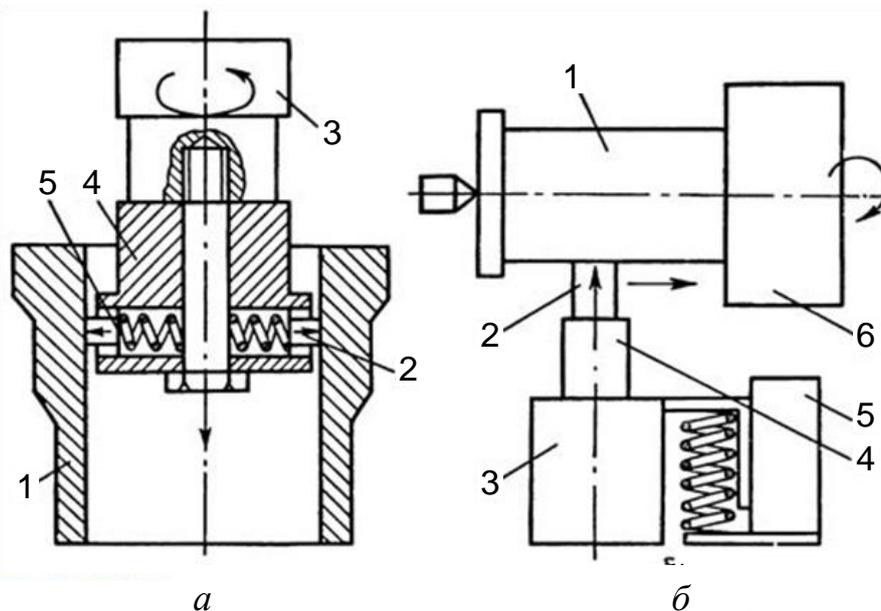


Рис. 7.5. Схема финишной антифрикционной безабразивной обработки цилиндрических поверхностей деталей: а – внутренних; б – наружных; 1 – деталь; 2 – инструмент (наносимый цветной металл); 3 – электромотор; 4 – шпиндель; 5 – прижимное устройство инструмента к детали; б – патрон станка

ФАБО имеет следующие разновидности:

- нанесение покрытий прутком из бронзы или меди;
- обработка деталей в жидких средах, содержащих химические соединения металлов (медь, олово, висмут и др.), способных восста-

навливаться (выделять чистый металл) на поверхностях деталей под воздействием роликов, брусков и щеток;

- нанесение твердосмазочных покрытий (графит, дисульфид молибдена) натиранием брусками. Например, износостойкость гильз цилиндров с медным дисульфидмолибденовым покрытием возрастает в 2 раза, а поршневых колец в 1,9 раза.

ФАБО применяют также для обработки шеек коленчатых валов двигателей. При этом обработку ведут на токарных станках или на станках для суперфиниша коленчатых валов с использованием «жимков», покрытых войлоком, или специальных обжимок с медными вставками и технологической жидкостью.

Преимущества ФАБО по сравнению с другими финишными операциями состоят в том, что метод чрезвычайно прост (ФАБО производят на токарном станке с помощью специального приспособления), не требует сложного оборудования и придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства.

Исследования свидетельствуют, что процесс ФАБО позволяет:

- снизить время приработки в 1,5...2 раза;
- исключить задиры поверхностей трения деталей;
- повысить несущую способность сочленений;
- защитить поверхность трения от водородного изнашивания;
- снизить температуру трения и продлить период работы узлов трения при выключении подачи смазки;
- уменьшить коэффициент трения;
- продлить срок службы подшипников качения до образования усталостных повреждений.

ФАБО является также эффективным способом борьбы с фреттинг-коррозией.

Контрольные вопросы к разделу 7

1. Методы повышения износостойкости деталей.
2. Способы улучшения условий нагружения.
3. Основные задачи при конструировании узла трения.
4. Что такое прямая пара трения?
5. Какое влияние на узел оказывает замена трения скольжения трением качения?

6. Влияние зазоров на сопряжение. От чего зависят зазоры?
7. Методы защиты рабочих поверхностей от загрязнения.
8. Типы уплотнительных устройств.
9. Технологические методы повышения износостойкости.
10. Что оказывает влияние на степень упрочнения и глубину наклепа поверхностного слоя?
11. Методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием.
12. Виды термической и термомеханической обработки деталей узлов трения.
13. В чем заключается химико-термическая обработка?
14. Что такое диффузионная металлизация?
15. Область применения газотермического напыления.
16. Назначение ФАБО. Перечислите виды ФАБО.

8. СМАЗЫВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

8.1. Роль смазочных материалов

Применение смазочных материалов для уменьшения силы трения известно с глубокой древности. На смену применяемым веками органическим маслам, главным образом растительным, в конце XIX в. пришли минеральные (нефтяные) масла. По мере развития науки и техники нефтяные масла совершенствовались; затем появились синтетические смазочные материалы, твердые и, наконец, самосмазывающиеся материалы.

Основное назначение смазочных материалов – уменьшение сопротивления трению и обусловленной им потери энергии, снижение износа поверхностей трения. Наряду с этим смазочные материалы выполняют и другие функции:

- отводят тепло из зоны трения и прилегающих узлов и деталей;
- предотвращают задиры, заедание и заклинивание поверхностей трения;
- препятствуют проникновению к поверхностям трения агрессивных жидкостей, газов и паров, а также абразивных частиц (пыли, грязи и т.п.);
- оказывают демпфирующее действие;
- защищают металлические поверхности от коррозии;
- уменьшают энергетические «затраты», что позволяет снизить потери мощности машин и механизмов.

8.2. Виды смазки и смазочных материалов

Смазочные материалы могут быть жидкими (масла, вода, серная кислота высокой концентрации в некоторых машинах химической промышленности, эмульсии и другие жидкости), газообразными (воздушная и газовая смазки), пластичными и твердыми (тальк, графит, дисульфид молибдена и др.).

По типу разделения поверхностей трения смазочным слоем различают гидродинамическую, гидростатическую, граничную и полужидкостную смазки.

Гидродинамическая (газодинамическая) смазка – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей тре-

ния осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости (газа) при относительном движении поверхностей.

Гидростатическая (газостатическая) смазка – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении или покое, осуществляется в результате поступления жидкости (газа) в зазор между поверхностями трения под внешним давлением.

Граничная смазка – смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемных.

Полужидкостная смазка – смазка, при которой частично осуществляется жидкостная смазка.

Масла по происхождению разделяют на следующие группы:

- минеральные или нефтяные;
- органические – растительные из семян (касторовые, горчичные, сурепные);
- животные (сало, технический рыбий жир, костное, спермацетовые);
- синтетические.

В промышленности наиболее широкое (до 95 %) применение нашли минеральные масла. По способу получения они могут быть: дистиллятные, полученные вакуумной перегонкой мазута; остаточные, полученные из остатка от вакуумной перегонки мазута – гудрона; компаундированные, полученные смешиванием дистиллятных и остаточных масел.

В зависимости от области применения выделяют следующие масла: моторные, индустриальные, трансмиссионные, гидравлические, индустриальные, турбинные, компрессорные, приборные, пищевые масла и жидкости и др.

Наиболее значительной по объему производства и ассортименту является группа моторных масел, подразделяемых на масла для бензиновых (карбюраторных) двигателей, дизелей и на универсальные масла для двигателей разных конструкций.

В группе индустриальных масел для промышленного оборудования выделяют масла для гидравлических систем, зубчатых передач закрытого типа (редукторов), направляющих и др. Трансмиссионные масла подразделяют на масла, используемые для смазывания механических, гидромеханических и гидростатических передач.

К органическим относятся растительные и животные масла, обладающие высокой смазывающей способностью, но имеющие плохую стойкость при высоких температурах. По этой причине в чистом виде их практически не используют, иногда добавляют к минеральным маслам для улучшения смазывающих свойств.

Современные синтетические смазочные материалы имеют очень высокое качество. Их применение позволяет резко расширить диапазон рабочих температур и увеличить сроки эксплуатации. Широкое применение синтетических углеводородов в компрессорах, редукторах, паровых турбинах приводит к снижению энергозатрат, уменьшению рабочей температуры и к повышению эффективности работы оборудования.

Температурный диапазон применения таких смазочных материалов шире, чем у минеральных масел и смазок, они могут обладать как более низкими, так и более высокими коэффициентами трения по сравнению с минеральными смазочными материалами. Синтетические смазочные материалы с низкими коэффициентами трения рекомендуется использовать в силовых трансмиссиях для снижения энергетических потерь, а с высокими коэффициентами трения – в качестве рабочих жидкостей для фрикционных вариаторов. Синтетические смазочные материалы обладают высокой долговечностью, высоким сопротивлением окислению, не содержат соединений, вызывающих образование осадка.

Смазочные материалы и системы смазки должны удовлетворять следующим требованиям:

- гарантированно 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-, пожаро- и взрывобезопасными.

8.3. Физико-химические характеристики смазочных материалов

Физико-химические характеристики смазочных материалов – это система регламентированных стандартами показателей для оценки качества. Рассмотрим основные характеристики.

Номинальная плотность (при заданной температуре). Плотность сама по себе не характеризует качества смазочного материала, но ее уменьшение сопровождается снижением вязкости и температуры вспышки.

Вязкость является одной из важнейших характеристик смазочных масел, определяющих силу сопротивления масляной пленки разрыву. Например, чем прочнее масляная пленка на поверхности трения, тем лучше уплотнение колец в цилиндрах.

Вязкость динамическая – это сила сопротивления двух слоев смазочного материала площадью 1 см^2 , отстоящих друг от друга на расстоянии 1 см и перемещающихся один относительно другого со скоростью 1 см/с.

Вязкость кинематическая определяется как отношение динамической вязкости к плотности жидкости.

Температура вспышки – низшая температура вспышки паров нагреваемого смазочного материала при приближении пламени в условиях обычного давления. Температура вспышки должна быть выше температуры смазываемой поверхности.

Температура застывания – это предельная температура, при которой масло теряет текучесть по определенному допуску (масло после наклона стандартной пробирки под углом 45° остается неподвижным в течение 1 мин). Косвенно по этой температуре можно судить о растекаемости смазочного материала по поверхности трения.

Противоизносные свойства характеризуют способность масла уменьшать интенсивность изнашивания трущихся деталей, снижать затраты энергии на преодоление трения. Эти свойства зависят от вязкости и вязкостно-температурной характеристики, смазывающей способности и чистоты масла.

Моюще-диспергирующие свойства. Моющие свойства характеризуют способность масла обеспечивать необходимую чистоту деталей двигателя и противостоять лакообразованию на горячих поверхностях, а также препятствовать прилипанию углеродистых соединений. Диспергирующие свойства характеризуют способность масла препятствовать слипанию углеродистых частиц, удерживать их в состоянии устойчивой суспензии и разрушать крупные частицы продуктов окисления при их появлении.

Противоокислительные свойства определяют стабильность масла, от которой зависит срок работы масел в двигателях, характеризуют их способность сохранять первоначальные свойства и проти-

востоять внешнему воздействию при нормальных температурах. Стойкость моторных масел к окислению повышается при введении антиокислительных присадок.

Коррозионная активность всех масел зависит от содержания в них сернистых соединений, органических и неорганических кислот и других продуктов окисления. В лабораторных условиях антикоррозионные свойства моторных масел оценивают по потере массы свинцовых пластин (в расчете на 1 м^2 их поверхности) за время испытания при температуре плюс 140°C .

Коррозионный износ деталей определяется также исходным значением *щелочности* и скоростью ее изменения. Чем больше проработало масло, тем ниже становится показатель щелочности.

Содержание механических примесей и воды. Механических примесей в маслах без присадок не должно быть, а в маслах с присадками их значение не должно превышать $0,015 \%$ по массе. Механические примеси не должны оказывать абразивного действия на трущиеся поверхности. Вода в моторных маслах должна отсутствовать. Даже небольшое количество воды вызывает деструкцию присадок, происходит процесс шламообразования.

Коксуемость – склонность масла при нагревании образовывать остаток с последующим термическим разложением остатка масла в отсутствие воздуха. Коксуемость определяется как вес кокса в процентах к навеске испытуемого смазочного материала.

Зольность – наличие в смазочном материале несгораемых веществ. Зольность определяют в лабораторных условиях и выражают процентным отношением образовавшейся золы к массе пробы масла, взятой для анализа. Зольность масел, не содержащих присадок, не превышает $0,02 \dots 0,025 \%$ по массе. У масел с присадками зольность не должна быть менее $0,4 \%$, а у высококачественных марок масел не менее $1,15 \dots 1,65 \%$ по массе. Повышенная зольность способствует увеличению твердости нагара в двигателях внутреннего сгорания.

Кислотное число (КОН) характеризует содержание кислот в смазочном материале. Водорастворимой кислотой в наработавшем смазочном материале может быть серная кислота. При отсутствии водорастворимых кислот начальная кислотность смазочного материала обусловлена нафтеновыми кислотами. Возрастание кислотного числа позволяет судить о степени его окисления смазочного материала. Кислотное число определяется как количество миллиграммов едкого калия, требующегося для нейтрализации 1 г смазочного материала.

Стабильность к сдвигу – это способность масла сохранять постоянную величину вязкости под воздействием высокой деформации сдвига при эксплуатации.

Температура каплепадения является показателем температурной стойкости смазки. При достижении данной температуры, определяемой в лабораторных условиях, происходит падение первой капли смазки, нагреваемой в специальном приборе. Надежное смазывание узлов трения без вытекания смазки обеспечивается, если рабочая температура узла на 15...20°C ниже температуры каплепадения пластичной смазки.

Пенетрация характеризует густоту смазки. Значение пенетрации определяется по шкале пенетрометра. Чем выше значение пенетрации, тем меньше густота (консистенция) данного смазочного материала.

Водостойкость – характеризует способность смазочного материала противостоять растворению в воде.

За исключением вязкости, все рассмотренные показатели либо косвенно и ограниченно характеризуют поведение смазочного материала в эксплуатации, либо служат для контроля их качества при производстве, транспортировке и хранении.

8.4. Присадки к смазочным материалам

Присадкой называют вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или изменения существующих. Смазочные материалы содержат, как правило, от 2 до 8 различных присадок. Эффективность действия присадок обуславливается их химическими свойствами и концентрацией в смазочных материалах, а также приемистостью последних к добавкам.

Присадки должны хорошо растворяться в смазочных материалах, обладать малой летучестью и не испаряться из них при хранении и эксплуатации в широком диапазоне температур; не вымываться водой и не подвергаться гидролизу; не задерживаться на фильтрах смазочной системы и не оседать на поверхностях; не взаимодействовать с конструкционными материалами, контактирующими со смазочными материалами (за исключением случаев, когда такие реакции лежат в основе механизма действия самих добавок); сохранять свои функции в присутствии иных добавок и не оказывать на них депрессивного действия.

По главному назначению (определяющему свойству) присадки условно объединяют в несколько групп, основные из которых рассмотрены ниже.

Присадки, улучшающие смазочные свойства. Их действие обусловлено образованием на трущихся металлических поверхностях различных по химическому составу защитных пленок. К этой группе можно отнести следующие присадки: противоизносные, противозадирные, антифрикционные, фрикционные.

Противоизносные присадки уменьшают износ поверхностей трения при относительно умеренных нагрузках и температурах. К этим добавкам относятся масла и жиры растительного и животного происхождения; высшие жирные кислоты (например, олеиновая), эфиры и др. Концентрация присадок в смазочных материалах 0,1...3,0 %.

Противозадирные присадки обеспечивают нормальную работу при высоких нагрузках трущихся поверхностей без задира и заедания. В случае задира поверхностей позволяют его «смягчить». К таким присадкам относятся соединения, содержащие серу (S), хлор (Cl) и др. Концентрация присадок не превышает 3...5 %.

Антифрикционные присадки предназначены для снижения (модификации) трения сопряженных поверхностей. К таким модификаторам относятся высшие жирные кислоты (например, стеариновая), мыла этих и нафтенных кислот, эфиры глицерина и жирные амины, коллоидные дисперсии дисульфида молибдена, графита и иных соединений, не растворимых в смазочных материалах. Концентрация присадок, как правило, 0,1...0,5 %.

Фрикционные присадки способствуют увеличению коэффициента трения и предотвращению проскальзывания трущихся поверхностей. В качестве таких добавок применяют органические кислоты и их производные – лауриновую кислоту и ее смесь с моноолеинфосфатом, стеараты магния (Mg), кальция (Ca) и цинка (Zn), сульфат бария (Ba) и т.д. Концентрация присадок от 0,1 до 2 %.

Антиокислительные присадки повышают стойкость смазочных материалов к окислению при высоких температурах. Ингибиторами окисления служат фенолы, соли сложных эфиров дитиофосфорных кислот и др. Антиокислительные добавки часто обладают хорошими противоизносными, а также антикоррозионными и моющими свойствами. Концентрация присадок от 0,01 до 3 %.

Антикоррозионные присадки предохраняют от коррозии узлы и детали машин и механизмов, особенно при повышенных температурах. Ингибиторы коррозии представляют собой в основном полярные ПАВ. Механизм их действия заключается в образовании на различных поверхностях защитных комплексов с каталитически активными соединениями металлов, накапливающихся в смазочном материале в результате химического растворения. В качестве ингибиторов кислотной коррозии используют бензотриазол, осерненные минеральные масла, сульфиды алкилфенолов и т.д. Концентрация присадок составляет от 1 до 3 %.

Особую группу ингибиторов составляют защитные, или антиржавейные, присадки, препятствующие атмосферной коррозии черных металлов. К ним относятся, например, синтетические жирные кислоты и их эфиры, нефтяные и синтетические сульфонаты и др. Концентрация присадок находится в пределах от 0,01 до 20 %.

Вязкостные, или загущающие, присадки повышают вязкость и улучшают вязкостно-температурные свойства смазочных материалов. В качестве таких добавок применяют обладающие большой вязкостью различные полимеры (полиизобутилен, полиметакрилаты, поливинилбутиловый эфир и т.д.). Концентрация присадок находится в диапазоне 1...20 %.

Моюще-диспергирующие присадки предупреждают или уменьшают образование на нагретых металлических поверхностях углеродистых отложений (осадков, нагаров, лаковых пленок) в результате окисления и термического разложения смазочных материалов. Моющие, или детергентные, присадки, адсорбируясь на указанных поверхностях, формируют на них слой, препятствующий накоплению отложений. Наиболее распространены присадки сульфонатные, алкилфенольные, алкилсалицилатные.

Особенность диспергирующих присадок – способность тонко измельчать и поддерживать во взвешенном состоянии большое количество твердых частиц, что стабилизирует их в объеме смазочного материала и предотвращает коагуляцию и осаждение на границе раздела фаз. Эти присадки представлены беззольными соединениями. Концентрация этих и детергентных присадок обычно не превышает 3...5 %. В моторных маслах при работе двигателей на высокосернистом топливе ее увеличивают до 10...15 %.

Депрессорные присадки понижают температуру застывания смазочных материалов (на 20...30°C) и улучшают их вязкостно-

температурные, а иногда моющие и антикоррозионные свойства. Депрессаторы – алкилнафталины и алкилфенолы и др. Концентрация присадок составляет от 0,05 до 1 %.

Дезэмульгирующие присадки устраняют возможность образования стойких эмульсий, особенно при увлажнении смазочных материалов. В качестве дезэмульгаторов используют соли сульфокислот, производные аминов и т.д. Концентрация присадок не превышает 0,05 %.

Антипенные присадки предотвращают вспенивание смазочных материалов благодаря снижению прочности их поверхностных пленок вследствие адсорбции на них частиц добавок. К таким присадкам относятся полисилоксаны и др. Концентрация присадок находится в пределах 0,001...0,005 %.

Антипиттинговые присадки предотвращают или ослабляют усталостные повреждения трущихся поверхностей. Добавками служат соединения, содержащие серу (S), полимеры и т.д. Концентрация присадок составляет 0,5...3 %.

Металлоплакирующие присадки снижают износ тяжело нагруженных узлов трения за счет образования на сопряженных поверхностях тонкой металлической пленки (сервовитной пленки).

Деактиваторы металлов уменьшают их каталитическую активность, предохраняя смазочные материалы от окисления. В качестве таких добавок применяют диамины, соединения, содержащие азот (N), фосфор (P). Концентрация присадок, как правило, не превышает 0,001 %, но иногда ее повышают на порядок.

Регуляторы набухания резин препятствуют утечке масла или смазки через герметизирующие устройства и снижают трение в местах уплотнения движущихся деталей. Концентрация присадок не более 2 %.

Многофункциональные присадки обладают способностью одновременно улучшать несколько свойств смазочных материалов, заменяя целые композиции вводимых в них добавок, применение которых дорого и неудобно, а эффективность действия снижается вследствие взаимного, часто противоположного влияния компонентов. Концентрация присадок 0,5...5 %.

Значительно реже используются адгезионные, антирадиационные, бактерицидные, красящие и иные присадки.

При разработке ряда современных масел (особенно моторных) испытания показывают, что отдельные виды присадок не в состоянии обеспечить совокупность необходимых эксплуатационных свойств смазочного материала. Поэтому с учетом функционального действия

различных присадок производятся «пакеты присадок», включающие две и более присадки.

8.5. Жидкие смазочные материалы

По своей природе жидкие смазочные материалы (масла) делят на минеральные (нефтяные), синтетические, растительные и 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.

Поскольку масла должны обеспечивать гидродинамический режим трения, то их важнейшим показателем является вязкость. Вязкость масла сильно зависит от температуры, поэтому по международным и отечественным стандартам вязкость определяют при строго заданной температуре (плюс 50 и 100 °С). Для оценки служебных свойств масел с учетом влияния температуры на вязкость используется индекс вязкости. Чем выше индекс, тем меньше меняется вязкость с ростом температуры, тем лучше смазка.

Кроме того, другим важным 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 снижается, то происходит рост трения, износа, наступает разрушение рабочих поверхностей вследствие схватывания и заедания.

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 можно выделить группы гидравлических и смазочно-охлаждающих жидкостей.

8.5.1. Моторные масла

Моторные масла предназначены 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 бензиновых двигателях достигает плюс 270...280 °С, в дизельных – плюс 300...330 °С. В картере средняя температура масла составляет плюс 80...100 °С, в то время как температура газов, прорывающихся в картер, у бензиновых двигателей плюс 150...450 °С, а в дизельных достигает плюс 500...700 °С.

Современные моторные масла должны отвечать многим требованиям, главными из которых являются:

- высокие моющие и диспергирующе-стабилизирующие свойства, обеспечивающие чистоту деталей двигателя;
- высокая термическая и термоокислительная стабильность, что позволяет использовать масла для охлаждения поршней, повышать предельный нагрев масла в картере, увеличивать срок замены;
- достаточные противоизносные свойства, обеспечиваемые прочностью масляной пленки, нужной вязкостью при высокой температуре и высоком градиенте скорости сдвига;
- отсутствие коррозионного воздействия на материалы деталей двигателя, как в процессе работы, так и при длительных перерывах;
- стойкость к старению, способность противостоять внешним воздействиям с минимальным ухудшением свойств;
- пологость вязкостно-температурной характеристики, обеспечение холодного пуска и надежного смазывания в экстремальных условиях при высоких нагрузках и температуре окружающей среды;
- совместимость с материалами уплотнений, совместимость с катализаторами системы нейтрализации отработавших газов;

- высокая стабильность при транспортировании и хранении в регламентированных условиях;
- малая вспениваемость при высокой и низкой температурах;
- малая летучесть, низкий расход на угар (экологичность).

Согласно ГОСТ 17479.1-85, моторные масла подразделяются на классы по вязкости и группы по назначению и уровням эксплуатационных свойств. Моторные масла по назначению и эксплуатационным свойствам делятся на 6 групп (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Группы моторных масел по назначению и эксплуатационным свойствам (ГОСТ 17479.1-85)

Группа		Рекомендуемая область применения
1		2
А		Нефорсированные бензиновые двигатели и дизели
Б	Б1	Малофорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют образованию высокотемпературных отложений и коррозии подшипников
	Б2	Малофорсированные дизели
В	В1	Среднефорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют окислению масла и образованию отложений всех видов
	В2	Среднефорсированные дизели, предъявляющие повышенные требования к антикоррозионным, противоизносным свойствам масел и способности предотвращать образование высокотемпературных отложений
Г	Г1	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях, способствующих окислению масла, образованию отложений всех видов и коррозии
	Г2	Высокофорсированные дизели без наддува или с умеренным наддувом, работающие в эксплуатационных условиях, способствующих образованию высокотемпературных отложений
Д	Д1	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в эксплуатационных условиях, более тяжелых, чем для масел группы Г1
	Д2	Высокофорсированные дизели с наддувом, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях или когда применяемое топливо требует использования масел с высокой нейтрализующей способностью, антикоррозионными и противоизносными свойствами, малой склонностью к образованию всех видов отложений

1		2
E	E1	Высокофорсированные бензиновые двигатели и дизели, работающие в эксплуатационных условиях более тяжелых, чем для масел групп Д1 и Д2
	E2	Отличаются повышенной диспергирующей способностью, лучшими противоизносными свойствами
По ГОСТу марки отечественных моторных масел начинаются с буквы М (моторное), за которой указывается класс вязкости и буквенным обозначением группы по эксплуатационным качествам (А, Б, В, Г, Д, Е) с индексом 1 – для бензиновых, 2 – для дизельных двигателей		

Моторные масла в зависимости от кинематической вязкости делят на классы: четыре зимних – 3_з; 4_з; 4_з; 6_з; восемь летних – 8; 10; 12; 14; 16; 20; 24; остальные – всесезонные.

Нередко возникает необходимость решения вопросов взаимозаменяемости отечественных и зарубежных моторных масел, например, когда необходимо выбрать отечественное масло для импортной техники или зарубежное масло для экспортируемой отечественной техники. Общепринятой в международном масштабе стала классификация моторных масел по вязкости Американского общества автомобильных инженеров – SAE J300. Уровень эксплуатационных свойств и область применения зарубежные производители моторных масел в большинстве случаев указывают по классификации API (Американский институт нефти). ГОСТ 17479.1-85 в справочных приложениях дает примерное соответствие классов вязкости и групп по назначению и эксплуатационным свойствам, изложенным в ГОСТе, классам вязкости по SAE и классам API по условиям и областям применения моторных масел.

Согласно SAE J 300 моторные масла по вязкости классифицируют на шесть зимних классов моторных масел (SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W) и пять летних классов (SAE 20, 30, 40, 50, 600).

Классификация API подразделяет моторные масла на две категории: "S" (Service) – масла для бензиновых двигателей и "C" (Commercial) – масла для дизельных двигателей. В настоящее время в категории "S" классификация API включает 10 классов масел в следующем порядке возрастания требований к их качеству (SA, SB, SD, SE, SF, SG, SH, SJ, SL), а в категории "C" – 11 классов (CA, CB, CC,

CD, CD-II, CF, CF-4, CF-2, CG-4 и CH-4). Цифры при обозначении классов CD-II, CF-4, CF-2 и CG-4 дают дополнительную информацию об использовании данного класса масел в 2-тактных или 4-тактных дизелях соответственно. Для обозначения универсальных масел принята двойная маркировка, например, SF/CC, SG/CD, CF-4/SH и т.п.

В моторные масла вводятся ряд присадок, повышающих эксплуатационные свойства: моющие (3...15 %), диспергирующие нагар (1...2 %), антиокислительные и противоизносные (до 2 %), антикоррозийные (до 1 %), а также вязкостные и антипенные.

8.5.2. Трансмиссионные масла

Трансмиссионные масла предназначены для зубчатых, цепных и других механических передач. Они используются в коробках переключения передач, редукторах, дифференциалах мостов автомобилей.

В зубчатых передачах контакт между зубьями осуществляется по линии, поэтому контактные давления достигают больших значений (2 ГПа). Скорость 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 плюс 150...200 °С. В столь тяжелых условиях эксплуатации смазочный материал должен гарантировать разделение контактирующих поверхностей, предотвращать задир и заедание, снижать износ и разрушение в результате питтинга. Кроме перечисленных требований масла должны иметь стабильную вязкость, низкую температуру застывания, хорошие противокоррозионные свойства.

Необходимые свойства трансмиссионных масел в основном обеспечивают присадки. Наряду с растворимыми, в качестве присадок используются стабильные суспензии графита, дисульфида молибдена и других нерастворимых компонентов.

Многообразие вырабатываемых трансмиссионных масел, предназначенных для разнообразной техники, вызвало необходимость разработки и использования классификаций масел, которые позволяют правильно решить вопрос выбора сорта масла для данной конструкции трансмиссии. Отечественная классификация трансмиссионных масел отражена в ГОСТ 17479.2-85.

В зависимости от уровня кинематической вязкости (при температуре плюс 100 °С) трансмиссионные масла разделяют на четыре класса.

По своему назначению трансмиссионные масла делятся на пять групп, каждая из которых имеет свою рекомендуемую область применения (табл. 8.2).

Таблица 8.2

**Группы трансмиссионных масел по назначению
и эксплуатационным свойствам (ГОСТ 17479.2-85)**

Группа	Состав масел	Рекомендуемая область применения
1	Минеральные масла без присадок	Цилиндрические, конические и червячные передачи, работающие при контактных напряжениях 900...1600 МПа и температуре масла в объеме до плюс 90 °С
2	Минеральные масла с противоизносными присадками	Цилиндрические, конические и червячные передачи, работающие при контактных напряжениях до 2100 МПа и температуре масла в объеме до плюс 130 °С
3	Минеральные масла с противозадирными присадками умеренной эффективности	Цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 2500 МПа и температуре масла в объеме до плюс 150 °С
4	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности	Цилиндрические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 3000 МПа и температуре масла в объеме до плюс 150 °С
5	Минеральные масла с противозадирными присадками и многофункционального действия	Гипоидные передачи, работающие с ударными нагрузками при контактных напряжениях выше 3000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С

Обозначение трансмиссионных масел состоит из букв ТМ (трансмиссионное масло), цифры (группа масса по эксплуатационным свойствам) и двух цифр (класс вязкости). Допускается использовать уточняющее обозначение, например «З» – загущенное. Например, ТМ-5-12 З (рк) – трансмиссионное масло пятой эксплуатационной группы, двенадцатого класса вязкости, загущенное, рабочее консервационное.

Для трансмиссионных масел зарубежных фирм используют две классификации: по вязкости – классификация SAE; по уровню эксплуатационных свойств и области применения – классификация API.

Классификация SAE J306 включает три зимних (SAE75W, 80W, 85W) и три летних класса вязкости.

Классификация трансмиссионных масел по эксплуатационным свойствам (API) приведена в таблице 8.3. Пять категорий показывают применимость и качественный уровень продуктов, помечаемых соответствующим индексом.

Таблица 8.3

Классификация трансмиссионных масел согласно API

Категория по API	Тип	Область применения	Соответствие ГОСТ
GL-1	Минеральное масло без присадок	Цилиндрические, червячные и спирально-конические зубчатые передачи	TM1
GL-2	Содержит жирные продукты	Червячные передачи, промышленное оборудование	TM2
GL-3	Содержит противозадирные присадки	Ручные КПП, спирально-конические передачи (КПП и задние мосты грузовых автомобилей)	TM3
GL-4	Содержит противозадирные, противозносные и другие присадки	Ручные КПП, спирально-конические передачи	TM4
GL-5	Содержит противозадирные, противозносные и другие присадки	Гипоидные и другие типы передач (КПП и ведущие мосты легковых автомобилей)	TM5

8.5.3. Индустриальные масла

Индустриальные масла – дистиллятные нефтяные масла малой и средней вязкости (5...50 мм²/с при температуре плюс 50 °С), используемые в качестве смазочных материалов, преимущественно в узлах трения станков, вентиляторов, насосов, текстильных машин, а также

как основа при изготовлении гидравлических жидкостей, пластичных и технологических смазок.

Назначение промышленных масел – снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания узлов трения. Одновременно промышленные масла должны: отводить тепло от узлов трения; защищать детали от коррозии; очищать поверхности трения от загрязнения; быть уплотняющим средством; не допускать образования пены при контакте с воздухом; предотвращать образование стойких эмульсий с водой или быть способными эмульгировать; хорошо фильтроваться через фильтрующие элементы; быть нетоксичными; не иметь неприятного запаха и т.д.

Промышленные масла с комплексом присадок (антиокислительной, противоизносной, антикоррозионной и др.) применяются для смазывания подшипников, редукторов и гидравлических систем промышленного оборудования. Эти масла называют легированными промышленными маслами. Их применение обеспечивает повышение надежности работы оборудования и его производительности, увеличения срока службы масел в 2...4 раза по сравнению с маслами без присадок.

В качестве промышленных используют многие масла, отнесенные по основному назначению к моторным, гидравлическим, трансмиссионным, турбинным и другим группам.

В зависимости от области применения их условно классифицируют на масла общего и специального назначения.

Кроме того, масла каждой из этих групп подразделяли на три подгруппы по кинематической вязкости. Также их разделяют: по характеру исходной нефти – на масла из малосернистой и сернистой нефти; по способу очистки – на масла селективной, сернокислотной, адсорбционной очистки, выщелоченные и др.

В основу современной классификации промышленных масел различного назначения положен принцип их деления на группы в зависимости от области применения и эксплуатационных свойств.

Международной организацией по стандартам (ISO) разработан ряд стандартов, касающихся классификации промышленных масел: ISO 3448–75 «Смазочные материалы промышленные. Классификация вязкости», ISO 6743/0-81 «Классификация смазок и промышленных масел». С учетом требований ISO и ГОСТ 17479.0–85 «Масла нефтяные. Классификация и обозначения. Общие требования» разработан ГОСТ 17479.4–87 «Масла промышленные. Технические требования».

По назначению выделяют четыре основные группы промышленных масел для смазывания наиболее распространенных типов узлов трения:

- группа Л – легко нагруженные узлы (шпиндели, подшипники и сопряженные с ними соединения);
- группа Г – гидравлические системы;
- группа Н – направляющие скольжения;
- группа Т – тяжело нагруженные узлы (зубчатые и другие передачи, подшипники и сопряженные с ними соединения).

Промышленные масла разбиты на пять подгрупп по уровню эксплуатационных свойств (табл. 8.4).

Промышленные масла по вязкости делятся на 18 классов: от класса 2 до класса 1500. Число, обозначающее класс вязкости промышленного масла, соответствует его вязкости при 40 °С.

Обозначение промышленных масел согласно ГОСТ 17479.4–87 включает группу знаков, разделенных между собой дефисом: первый знак (прописная буква «И») общий для всех марок независимо от состава, свойств и назначения масла; второй знак (прописная буква) – принадлежность к группе по назначению; третий знак (прописная буква) – принадлежность к подгруппе по эксплуатационным свойствам; четвертый знак – (цифра) класс вязкости. Например, марка И-Г-А-46 обозначает промышленное масло для систем гидравлики, без присадок, с вязкостью при 40 °С приблизительно 46 мм²/с.

Таблица 8.4

Классификация промышленных масел по эксплуатационным свойствам

Группа	Эксплуатационные свойства
А	Без присадок
В	С антиокислительными и антикоррозионными присадками
С	Тип В с противоизносными присадками
Д	Тип С с противозадирными присадками
Е	Тип Д с противоскачковыми присадками

Обозначение промышленных масел согласно ГОСТ 17479.4–87 включает группу знаков, разделенных между собой дефисом: первый

знак (прописная буква «И») общий для всех марок независимо от состава, свойств и назначения масла; второй знак (прописная буква) – принадлежность к группе по назначению; третий знак (прописная буква) – принадлежность к подгруппе по эксплуатационным свойствам; четвертый знак (цифра) класс вязкости. Например, марка И-Г-А-46 обозначает промышленное масло для систем гидравлики, без присадок, с вязкостью при 40 °С приблизительно 46 мм²/с.

При разработке легированных масел их обозначают, руководствуясь сложившимися правилами, например: масла серии ИГП – промышленные гидравлические с присадками; ИСП – промышленные из сернистой нефти с присадками и т. п.

При выборе промышленных масел для конкретных условий эксплуатации следует учитывать назначение масла, уровень эксплуатационных свойств, значение вязкости.

8.5.4. Масла специального назначения

К маслам специального назначения относятся гидравлические масла, масла для реактивных двигателей, турбинные масла, компрессорные масла и др.

Гидравлические масла предназначены для передачи усилия от привода к исполнительному или управляющему механизму за счет гидростатического давления в системе. Кроме того, они производят смазывание узлов трения гидросистемы, отводят тепло из зоны трения, очищают детали от загрязнения. Гидравлические масла должны обладать оптимальной вязкостью, способной обеспечить жидкостный режим работы. Высокий уровень вязкости масел приводит к значительным потерям энергии.

Гидравлические жидкости состоят из глубокоочищенных масел без присадок или с присадками (вязкостные, противоизносные, антикоррозионные, антиокислительные, антипенные).

Масло для реактивных двигателей предназначено для смазывания узлов трения газотурбинных двигателей. Кроме того, выполняют функцию гидравлической жидкости. Смазывание осуществляется путем непрерывной циркуляции масла, подаваемого через форсунки под давлением к поверхности трения.

Тяжелые условия работы (частота вращения газовых турбин 12000...20000 мин⁻¹, температура от минус 50 до плюс 150 °С) определяют требования к этим маслам: хорошие смазочные и антиокис-

лительные свойства, высокий индекс вязкости и прокачиваемости при низких температурах, минимальная испаряемость летучих фракций и неагрессивность по отношению к материалам, контактирующим с маслом.

Турбинные масла предназначены для смазывания и охлаждения пар трения (подшипники) паровых, водяных и газовых турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов, воздуходувок и электрогенераторов. Также турбинные масла используют в качестве рабочих жидкостей в системах регулирования турбоагрегатов.

Турбинные масла должны обладать хорошей стабильностью против окисления, не выпадать в осадок, защищать рабочие поверхности деталей от коррозионного воздействия, не образовывать стойких эмульсий с водой.

Компрессорные масла предназначены для смазывания узлов и деталей компрессоров, эксплуатируемых в различных отраслях промышленности. В поршневых и ротационных компрессорах масло находится в непосредственном контакте с газом, нагреваемым при сжатии до высоких температур (170...180 °С). Состав и свойства газа оказывают заметное влияние на эффективность компрессорных масел.

К компрессорным маслам предъявляются следующие требования: термоокислительная стабильность; способность предотвращать образование кокса в нагнетательных линиях; термическая стабильность. Важной характеристикой компрессорных масел являются их смазочные свойства. Требования к компрессорным маслам близки к требованиям к моторным маслам.

8.6. Пластичные смазочные материалы

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) представляют собой минеральные и синтетические масла, состоящие из загустителя (твердые углеводороды, различные соли жирных кислот и др.), присадок и наполнителей (графит, дисульфид молибдена и др.).

В зависимости от назначения различают антифрикционные (предназначенные для снижения трения и износа в механизмах), консервационные (предохранительные, защитные), предназначенные для защиты металлов от коррозионного воздействия, и уплотнительные ПСМ, предназначенные для герметизации зазоров в механизмах. Большинство современных ПСМ, удовлетворяя требованиям по своему прямому назначению, одновременно обладают определенными

свойствами, допускающими их использование и по другим назначениям. Например, антифрикционные ПСМ в некоторых случаях можно использовать как консервационные или уплотнительные. Существуют также ПСМ, обладающие специальными свойствами. Например, электропроводящие ПСМ, предназначенные для обеспечения эффективного электрического контакта между поверхностями, фрикционные – для предотвращения проскальзывания поверхностей путем увеличения трения между ними, прирабочные – для улучшения приработки поверхностей и т.д.

В зависимости от характера и прочности образуемого загустителем каркаса различают консистентные, полужидкие и жидкие ПСМ.

В зависимости от вида загустителя ПСМ различают мыльные, углеводородные, органические и неорганические ПСМ.

Основными достоинствами пластичных смазочных материалов являются:

- хорошее удерживание на наклонных и даже вертикальных поверхностях;
- высокие показатели противоизносных и противозадирных свойств (особенно при жестких режимах трения);
- защита металлических поверхностей от коррозионного воздействия внешней среды;
- высокая герметизация узлов трения и защита их от проникновения нежелательных продуктов;
- надежная и эффективная работа в жестких условиях эксплуатации при одновременном воздействии высоких температур, давлений, ударных нагрузок, переменном режиме скоростей и т.п.;
- работоспособность в контакте с водой и другими агрессивными средами;
- экономичность в применении благодаря более продолжительной работоспособности, меньшему расходу и меньшим затратам на обслуживание техники.

К недостаткам пластичных смазочных материалов следует отнести:

- расслоение, расплавление и вытекание при длительной работе в условиях повышенной температуры;
- отсутствие отвода тепла от смазываемых деталей;
- низкую стабильность мыльных смазок к окислению;
- более сложную систему подачи смазки к узлу трения.

8.6.1. Мыльные пластичные смазочные материалы

В мыльных ПСМ загустителем являются соли высших жирных кислот – мыла. Для изготовления этих ПСМ используют природные (растительные и животные) жиры или синтетические жирные кислоты.

Мыльные ПСМ разделяют на две группы:

- жировые – используются жирные кислоты масел растительного происхождения;

- синтетические – используются синтетические жирные кислоты.

Мыла, получаемые из твердых (животных) природных жиров, имеют лучшие показатели. Мыльные загустители используют в основном для изготовления антифрикционных ПСМ.

В зависимости от вида загустителя ПСМ разделяют на кальциевые, натриевые, кальциево-натриевые, алюминиевые, магниевые и др.

Кальциевые ПСМ обладают хорошей влагостойкостью (используются в условиях с повышенной влажностью и в контакте с водой) и хорошей коллоидной стабильностью. Вследствие сравнительно плохих показателей по ряду эксплуатационных свойств они вытесняются более качественными ПСМ.

К кальциевым ПСМ относят солидолы. Используются преимущественно в механизмах, работающих в условиях повышенной влажности (сельскохозяйственная техника и т.п.). При плавлении теряют содержащуюся в них свободную и связанную воду и начинают распадаться на масло и мыло. После охлаждения солидола его смазочные свойства не восстанавливаются. Рабочая температура до плюс 70° С.

Применяют солидолы следующих марок.

УС-1 (пресс-солидол) – жировой солидол. Обладает следующими характеристиками: температура каплепадения не ниже 75 °С; температурный диапазон работоспособности от минус 40 до плюс 50 °С. Предназначен для узлов трения, в которых смазка вводится под давлением.

УС-2 – жировой солидол. Температура каплепадения не ниже 75 °С, температурный диапазон работоспособности от минус 25 до плюс 50 °С. Предназначен для подшипников качения и скольжения, шарниров, винтовых и цепных передач и пр.

С – синтетический солидол. Температура каплепадения не ниже 80°С, температурный диапазон эксплуатации от минус 25 до плюс 50°С.

Пресс-солидол С – синтетический солидол. Температура каплепадения не ниже 80 °С, температурный диапазон эксплуатации от

минус 40 до плюс 50 °С. Предназначен для смазки узлов трения, в которые смазка вводится под давлением.

Пресс-солидолы УС-1 и С отличаются более мягкой структурой по сравнению с солидолами УС-2 и С, что облегчает их введение через пресс-масленки.

УСсА – синтетический солидол. В состав УСсА входит до 10 % молотого графита грубого помола, что придает ему повышенные противозадирные свойства и токопроводность.

Выпускаются комплексные кальциевые смазки, обладающие по сравнению с солидолами повышенной термической стабильностью (выше плюс 200 °С), что позволяет использовать их при температурах до плюс 160 °С, а также лучшими противоизносными и противозадирными свойствами. К таким смазкам относят Униол-1, Униол-2, ЦИАТИМ-221, Униол-3 и Униол-3М. Последние две марки изготовлены на смеси маловязких масел и обладают благодаря этому хорошими низкотемпературными свойствами. В смазку Униол-М добавлен дисульфид молибдена.

Натриевые ПСМ более термостойки, но не влагостойки. Они легко растворяются в воде, выделяя свободные жирные кислоты и щелочи, вызывающие коррозию металла, и образуют легко смываемую с трущихся поверхностей эмульсию. Основным недостатком натриевых ПСМ является низкая влагостойкость и плохие низкотемпературные свойства (не рекомендуется применять при температурах ниже 20 °С).

К натриевым ПСМ относятся широко распространенные антифрикционные ПСМ – консталины. Выпускают жировые консталины марок УТ-1 и УТ-2, представляющие собой антифрикционные, тугоплавкие смазки, температурный диапазон их работоспособности от минус 10 до плюс 115°С.

К натриевым и натриево-кальциевым ПСМ относятся также марки 1-13, АМ, ЯНЗ-2, КСБ. Смазка ЯНЗ-2 приближается по своим свойствам к Литол-24. Смазка КСБ обладает электропроводностью благодаря добавкам дисперсной меди. Натриевые и натриево-кальциевые смазки из-за низкой влагостойкости не могут использоваться в качестве консервационных. Натриево-кальциевые ПСМ занимают промежуточное по термо- и влагостойкости положение между кальциевыми и натриевыми ПСМ.

Литиевые ПСМ – литолы. Они обладают высокими антифрикционными свойствами, водостойки. Рабочий диапазон температур от минус 50 до плюс 130° С.

К литиевым относятся следующие ПСМ:

Литол-24 – антифрикционная, консервационная водостойкая смазка. Температура каплепадения не ниже 175 °С, температурный диапазон работоспособности от минус 40 до плюс 130°С. Предназначена для подшипников качения и скольжения, зубчатых передач и пр.;

ЦИАТИМ-201 – антифрикционная низкотемпературная смазка. Температура каплепадения не ниже 175 °С. Предназначена для узлов трения, работающих с малыми нагрузками;

Фиол-1 – смазка, близкая по составу к Литол-24, но отличается от нее лучшими низкотемпературными свойствами, меньшей вязкостью и меньшим пределом прочности;

Фиол-3 – смазка, по основным свойствам практически идентичная Литол-24;

Фиол-2 обладает промежуточными свойствами между Фиол-1 и Фиол-3;

ЛЗ-31 – высокостабильная смазка, изготавливаемая на сложных эфирах, обладает пониженной влагостойкостью;

Северол-1 – антифрикционная смазка; температурный диапазон работоспособности от минус 50 до плюс 120 С;

Н-158 – высокостабильная смазка. Температурный диапазон работоспособности от минус 30 до плюс 150 °С. Применяется для подшипников автотракторного электрооборудования.

К *бариевым ПСМ* относится смазка ШРБ-4. Температурный диапазон работоспособности от минус 40 до плюс 150 °С. Этот ПСМ обладает высокими антифрикционными и консервационными свойствами, а также практически не воздействует на резинотехнические изделия.

Свинцовые ПСМ с добавкой сернистых соединений отличаются высокими противозадирными свойствами.

Недостаток, сужающий область применения всех мыльных ПСМ, состоит в том, что после расплавления при последующем охлаждении они не способны восстанавливать структуру. Это исключает возможность их повторного использования, поэтому мыльные ПСМ нельзя наносить на поверхности трения и подавать к ним в расплавленном состоянии.

8.6.2. Углеводородные пластичные смазочные материалы

Углеводородные ПСМ – это масла, содержащие определенное количество высокоплавких углеводородов. Их получают путем загу-

щения высоковязких жидких нефтяных масел церезинами и парафинами. Они обладают высокой химической стабильностью и влагостойкостью, что наряду с возможностью нанесения на поверхности в расплавленном состоянии (с последующим после охлаждения восстановлением структуры и свойств) определяет область их преимущественного применения в качестве консервационных ПСМ.

Наиболее распространенной углеводородной ПСМ является консервационная смазка ПВК. Смазка предназначена для консервации (до 10 лет) изделий из черных и цветных металлов при хранении на складах или на открытых площадках.

К углеводородным консервационным ПСМ относятся также смазки ГОИ-54; пушечная (УНЗ); вазелин технический волокнистый (ВТВ-1) (применяется для смазывания зажимов аккумуляторов) и др.

Основными качественными характеристиками пластичных материалов являются температура каплепадения, пенетрация и содержание механических примесей.

8.6.3. Органические пластичные смазочные материалы

Основной недостаток мыльных и углеводородных ПСМ – их относительно низкая термическая и химическая стабильность, ограничивающая область применения этих смазок. В настоящее время разработаны новые типы загустителей на основе органических веществ, обладающих высокой термической и химической стабильностью и не интенсифицирующих процесс окисления масел.

К *органическим ПСМ* относятся фталоцианиновые, полимерные и фторуглеродные ПСМ.

Фталоцианиновые ПСМ обладают длительной работоспособностью при температурах свыше 180 °С, имеют высокие антиокислительные свойства, высокую влагостойкость, отличаются хорошей коллоидной стабильностью. Это объясняется тем, что используемые в качестве загустителя в таких смазках фталоцианиновые пигменты являются наиболее стабильными комплексными соединениями – они практически не окисляются на воздухе при температурах ниже 330 °С.

Полимерные ПСМ – это пластичные смазки, в которых в качестве загустителей используют твердые высокомолекулярные полимеры: полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен, политрифторхлорэтилен и пр.

Фторуглеродные ПСМ – это пластичные смазки, полученные загущением жидких фторуглеродных полимеров тонкодисперсными твердыми фторуглеродными полимерами. Обладают наибольшей химической стабильностью. Могут работать в прямом контакте с жидким и газообразным водородом, кислородом, окислами азота, галоидами, галоидоводородами и пр.

8.6.4. Неорганические пластичные смазочные материалы

При повышенных температурах, в агрессивных средах практически единственным работоспособным видом ПСМ являются смазки, загущаемые неорганическими материалами. В настоящее время известно большое количество неорганических загустителей, многие из которых являются твердыми смазками. Например, используются графит, двухсернистый молибден, глина, сажа, слюда, силикагель, силикаты, сульфаты, сульфиды, окислы и гидроокиси металлов и др. К ПСМ такого типа относятся, в частности, ВНИИНП-262, -264, -279.

Для обеспечения работоспособности неорганических смазок при высоких температурах в качестве дисперсионной среды в них используют высококачественные синтетические масла. Для придания жидкой фазе тех или иных свойств (или усиления имеющихся) в жидкую фазу вводят соответствующие присадки.

8.7. Металлоплакирующие смазочные материалы

Металлоплакирующие смазочные материалы (МСМ) – это пластичные смазки, масла и смазочно-охлаждающие жидкости, в состав которых входят металлсодержащие (по массе от 0,1 до 10 %) присадки: порошки металлов, их оксидов, сплавов, солей, комплексных соединений металлов и др.

МСМ применяют в тяжелонагруженных узлах качения и скольжения самолетов, автомобилей, двигателей внутреннего сгорания, прокатного металлургического оборудования, текстильного, швейного и обувного оборудования и др. Использование металлоплакирующих смазок позволяет повысить долговечность узлов трения в 2..3 раза, снизить потери на трение, уменьшить расход смазочных материалов в 2..3 раза. МСМ являются одним из перспективных видов антифрикционных смазок.

Впервые в мире МСМ стали производить в СССР. По заказу авиационной промышленности были разработаны смазки Свинцоль-01

и Свинцоль-02. В настоящее время номенклатура пластичных смазок расширилась. К вышеуказанным маркам прибавились МС Вымпел и МС 1000. Наибольшее распространение получили металлоплакирующие смазки, образующие медную сервовитную пленку.

МС 1000 – это универсальная металлоплакирующая смазка для узлов трения всех типов: подшипников, крестовин, шестерен, наконечников рулевых тяг, шаровых опор, шарниров равных угловых скоростей. В качестве присадок используются цинк и дисульфид молибдена. Образующая металлическая защитная пленка обладает высокой износостойкостью и способностью к постоянному самовосстановлению из компонентов смазки. Смазка достаточно морозостойка – сохраняет свою работоспособность при температурах от минус 55 до плюс 150 °С.

При реализации эффекта безызносности на трущихся поверхностях деталей в процессе работы узлов трения формируется тонкая, трудноподдающаяся окислению защитная самовосстанавливающаяся металлическая пленка из введенных в смазку присадок. Толщина пленки составляет от нескольких атомных слоев до 1...2 мкм.

Металлическая сервовитная пленка, образующаяся в процессе трения, имеет рыхлую структуру, пориста, в ней почти отсутствуют дислокации и имеется большое количество вакансий.

Повышенная эффективность МСМ обусловлена следующими факторами.

1. При использовании металлоплакирующих МСМ контакт поверхностей трения осуществляется через пластический деформирующийся мягкий и тонкий слой металла. При трении, как со смазкой, так и без смазки, детали контактируют на очень малой площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают весьма высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и к интенсификации изнашивания. При наличии сервовитной пленки площадь фактического контакта увеличивается в 10...100 раз, и материалы сопряженных деталей испытывают лишь упругие деформации, а износ поверхностей резко уменьшается.

2. Применение МСМ приводит к реализации эффекта Ребиндера. Обычные смазочные материалы являются кислородоносителями, они окисляют поверхности трения и тем самым уменьшают возможность их схватывания. Однако окисные пленки препятствуют проникновению среды к металлу, в результате чего эффект Ребиндера проявляет-

ся слабо, и пластической деформации подвергаются большие объемы металла. При использовании МСМ окисления поверхностей не происходит, трение носит восстановительный характер. Среда взаимодействует с металлом, и в результате пластическая деформация локализуется в тонком слое.

3. МСМ способствуют переносу частиц износа с одной поверхности трения на другую и удержанию этих частиц в зоне контакта электрическим полем. Продуктами износа при использовании обычных смазочных материалов являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда и свободно уносятся из зоны контакта. При наличии на поверхностях трения сервовитной пленки продукты износа состоят из частиц металла. Поверхность таких частиц пористая, за счет чего они покрываются адсорбционным слоем ПАВ, имеют электрический заряд, под действием которого сосредотачиваются в зазорах.

4. Применение МСМ способствует защите поверхностей трения от проникновения водорода. Водород образуется в процессе трения как продукт разложения водяных паров, топлива, смазочных материалов, смазочно-охлаждающих жидкостей, а также деструкции в зоне контакта полимеров. Он проникает в глубь стали или чугуна и ускоряет изнашивание деталей. Металлическая сервовитная пленка, образующаяся при использовании МСМ, защищает стальные поверхности трения от проникновения водорода. Кроме того, она снижает удельные нагрузки на контакте, отчего водорода образуется значительно меньше.

Использование МСМ дает следующие преимущества:

- возрастает срок службы деталей узлов трения;
- снижаются потери энергии на трение, увеличивается КПД машины и механизма;
- уменьшается расход смазочных материалов и увеличивается интервал между заменами;
- исключается возникновение задиров и схватывания трущихся деталей;
- снижается шум;
- взаимозаменяем с солидолами всех типов, смазочными материалами общего назначения и некоторые другими пластичными смазками.

Основным недостатком МСМ является их стоимость.

8.8. Твердые смазочные материалы

Твердые смазочные материалы (ТСМ) – это материалы, которые обеспечивают смазку между двумя поверхностями в условиях сухого или граничного трения в экстремальных условиях.

Основные типы ТСМ: графит, дисульфиды молибдена и вольфрама, нитрид бора, бромиды олова и кадмия, сульфат серебра, иодиды висмута, никеля и кадмия, фталоцианин, селениды и теллуриды вольфрама, титана и пр.

Графит обладает антифрикционными свойствами в паре трения со сталью, чугуном и хромом (несколько хуже эти свойства с медью и алюминием). В присутствии воздуха и воды графитная смазка улучшает свои показатели.

Для графита характерна способность адсорбироваться на поверхностях трения с образованием прочной пленки, ориентированной в направлении скольжения. Наличие на поверхности металла пленки оксидов облегчает адсорбцию графита, поэтому использование графита особенно эффективно для металлов, образующих прочную оксидную пленку (хром, титан, в меньшей степени сталь).

Температурный предел работоспособности графитной смазки равен плюс 600 °С. Коэффициент трения графита по стали составляет 0,04...0,08. С увеличением нагрузки и повышением температуры коэффициент трения возрастает.

Дисульфид молибдена (MoS_2) – синевато-серый порошок с металлическим блеском, обладает хорошими адсорбционными способностями по отношению к большинству черных и цветных металлов. Смазочная способность MoS_2 обусловлена выраженным слоистым строением кристаллов и сильной поляризацией атомов серы в процессе трения. В отличие от графита при увеличении нагрузки и температуры коэффициент трения дисульфида молибдена уменьшается (средняя величина 0,05...0,095).

Несущая способность граничной смазочной пленки дисульфида молибдена выше, чем у любых смазочных масел. При температурах выше 500 °С он окисляется с выделением диоксида серы (SO_2). Дисульфид молибдена обладает высокой радиационной стойкостью. Его можно использовать как смазочный материал при низких температурах, а также в вакууме.

К недостаткам дисульфида молибдена относится то, что он обладает высокой химической активностью и относительно легко всту-

пает в реакцию с водой и кислородом. Вследствие этого при контакте с воздухом максимально допустимая температура не более 450 °С. Водород способен восстанавливать дисульфид молибдена до металла.

Дисульфид вольфрама (WS_2) по сравнению с дисульфидом молибдена обладает большей термостойкостью (плюс 580 °С), стойкостью к окислению и в 3 раза большей несущей способностью. Химически инертен (кроме фтора и его соединений), коррозионно неагрессивен и нетоксичен. Его применение ограничено высокой стоимостью. Использование дисульфида вольфрама в качестве добавки к маслам осложнено его высокой плотностью ($\rho = 7,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), что затрудняет получение однородной смеси с маслом. Рекомендуются использовать при температурах свыше 450 °С.

Нитрид кремния (Si_3N_4) имеет низкий коэффициент трения в парах со стальными деталями и некоторыми металлокерамическими материалами. Обладает хорошими механическими характеристиками, высокой термической и термоокислительной устойчивостью (до 1200 °С). Благодаря сочетанию этих качеств нитрид кремния рассматривают как перспективный материал при изготовлении деталей цилиндропоршневой группы теплонапряженных двигателей.

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

Фталоцианины (меди $C_{32}H_{16}N_6C_{11}$, железа $C_{32}H_{16}N_8Fe$ и пр.) – металлосодержащие полициклические органические соединения, обладающие крупными плоскими молекулами со слабыми межмолекулярными связями. Характерной особенностью этих веществ является то, что наряду с физической адсорбцией они образуют хемосорбированные пленки на поверхностях металлов. Фталоцианины обладают хорошей термической (плюс 650 °С) и радиационной стойкостью, стабильны при контакте с воздухом и водой. При температурах до плюс 300 °С коэффициент трения у них выше, чем у графита и дисульфида молибдена, но понижается до 0,03...0,05 с увеличением температуры до плюс 500 °С.

Из фталоцианинов делают защитный слой на юбках поршней перспективных двигателей. Такие поршни повышают механический КПД и обладают повышенной стойкостью к заклиниванию.

В таблице 8.5 приведены средние величины коэффициентов трения для некоторых ТСМ.

К достоинствам твердых смазочных материалов относятся:
- широкий диапазон рабочих температур;

- возможность смазывания негерметичных узлов трения (смазочный материал не выдавливается и не вытекает);
- отсутствие необходимости в непрерывном подводе смазочного материала;
- малый расход смазочных материалов;
- низкие эксплуатационные расходы.

Недостатком ТСМ является более низкий отвод теплоты от поверхностей трения, чем у жидких масел, а также малая долговечность. Пополнение ТСМ часто сопряжено с трудностями конструкционного и эксплуатационного характера. Однако в некоторых узлах, работающих в условиях вакуума, единственным способом смазывания является применение только этих смазочных материалов. Также к недостаткам можно отнести худшую физическую и химическую стабильность, а также большую разницу в величинах коэффициентов трения покоя и движения.

Таблица 8.5

Значения коэффициентов трения для ТСМ

Твердый смазочный материал	Коэффициент трения
Дисульфид молибдена	0,05
Йодистый кадмий	0,06
Хлористый кадмий	0,07
Серноокислый вольфрам	0,08
Серноокисное серебро	0,14
Йодистый свинец	0,28
Графит (приработка во влажном воздухе)	0,10
Хлористый кобальт	0,10
Йодистая ртуть	0,18
Бромистая ртуть	0,06
Йодистое серебро	0,25

При использовании ТСМ необходимо, чтобы сопряженные поверхности трения имели необходимые антифрикционные свойства (прирабатываемость, отсутствие склонности к задирам и схватыванию).

Твердые смазочные материалы выпускаются в виде порошков, дисперсий, паст, покрытий. Их включают в состав различных продук-

тов, в т.ч. и жидких смазок в случае невозможности использования химических присадок из-за температурных условий.

Порошки. Чистый дисульфид молибдена производится с различным средним размером частиц. Он хорошо заполировывается в поверхность в течение времени или под воздействием повышенной внешней нагрузки, обладает хорошей адгезией к металлическим поверхностям. Смеси твердых смазочных материалов обычно используются в тормозных колодках, что обеспечивает высокое трение и малый износ.

Дисперсии. Высококонтрированные дисперсии ТСМ применяются в качестве добавок к маслам, таким как редукторные, трансмиссионные для двухтактных мотоциклов, дизельные. Дисперсии также используются в особых процессах формования металла и в качестве высокотемпературных цепных масел (маслоноситель испаряется, оставляя на поверхности твердый смазочный материал).

Пластичные смазки. ТСМ добавляются к пластичным смазкам в количестве примерно 3 %. Их преимущество перед химически реактивными присадками высокого давления заключается в отсутствии необходимости обеспечения температуры реакции. Кроме металлургии такие продукты применяются также в автомобилестроении, например, в шаровых шарнирах и шарнирах для передачи постоянной частоты вращения.

Пасты. Количество ТСМ в составе паст значительно выше, чем в пластичных смазках, и может достигать 70 % в зависимости как от типа твердого смазочного материала, так и от вязкости масла-носителя. В зависимости от области применения пасты разделяются на три категории:

- резьбовые – обеспечивают коэффициент трения порядка 0,1. Они обеспечивают разборку оборудования после длительного простоя, а также выдерживают ультравысокие температуры. Пасты также обладают совместимостью с высокопрочными сплавами, что используется при производстве турбин;

- сборочные – предотвращают фреттинг-коррозию, позволяют проводить безаварийную разборку при снятии подшипников с вала, обеспечивают очень низкий коэффициент трения и повышенную защиту от коррозии;

- смазочные – обеспечивают долговременное смазывание. При этом по таким параметрам, как адгезия защита от коррозии и температурная стойкость значительно превосходят жидкие смазки.

Антифрикционные покрытия («смазывающая краска») – это покрытия (краски), в которых цветовой пигмент заменен на твердый смазочный материал. Покрытия состоят из ТСМ, смол, тип которых зависит от желаемого метода полимеризации или устойчивости к среде, а также растворителя. Кроме этого в состав входят добавки, улучшающие пленкообразование и повышающие коррозионную стойкость.

В зависимости от геометрии покрываемых деталей, антифрикционные покрытия могут быть нанесены различными способами: аэрозоль, трафаретная печать, погружение, центрифугирование или электролитическое осаждение. Смазочные покрытия применяют только при трении без смазочного материала; в жидкостях они отслаиваются. Помимо снижения трения и защиты от износа они защищают поверхность от коррозии. Толщина пленки должна быть равна 5...15 мкм, более толстый слой подвержен растрескиванию и скалыванию.

Ряд твердых смазочных полимерных пленок (в виде суспензий) разработан во ВНИИНП. Их наносят распылением или погружением детали в суспензию. Отверждение производят при температуре плюс 120...300°С в течение 2...3 ч.

В агрессивных газах и парах применяют антифрикционные покрытия в виде фторопластовых лаков и суспензий. Наиболее распространенными являются антифрикционные лаки ВАФ-31, ФБФ-74Д, фторопластовая композиция ФК-33 и др. Эти композиции состоят из порошка фторопласта ЧД или ЧДП и связующего типа БФ. Суспензии и лаки наносят кистью, распылителем или погружением.

Мягкие металлы (свинец, индий, олово, кадмий, медь, серебро, золото и др.) могут применяться в качестве смазок, наносимых в виде тонких слоев (пленок) на более прочные основы. Поведение пленок этих металлов во многом сходно с маслами. Кроме того, они обладают свойством облегчать и ускорять процесс приработки. Например, пленка серебра толщиной 100...200 мкм, наносимая на основу гальваническими методами, обладает высокими антифрикционными свойствами и обеспечивает интенсивный отвод теплоты от поверхности трения.

8.8.1. Композиционные смазочные материалы

Перспективной областью использования отверждения являются *композиционные смазочные материалы (КСМ)*, представляющие собой комбинацию отдельных видов твердых смазок, обеспечивающую оптимальное сочетание их смазочных свойств, механической прочно-

сти и обрабатываемости. Основным преимуществом КСМ является обеспечение хороших антифрикционных и противоизносных свойств в течение длительного времени.

Физически КСМ представляет собой механическую смесь двух или более различных по свойствам твердых веществ. Одно из них является основой и может образовывать структурный каркас – матрицу, обуславливающую заданные механические свойства. Матрицу изготавливают из полимерных, металлических или керамических материалов. В структурном каркасе матрицы зафиксированы материалы, являющиеся наполнителем КСМ. Наполнитель обеспечивает смазочные свойства КСМ.

К достоинствам КСМ с полимерной матрицей (полимерных КСМ) относятся хорошие смазочные свойства, химическая инертность, более высокая, чем у металлов, усталостная прочность, малая масса, низкая чувствительность к локальным нарушениям структуры (трещинам, надразам). Наиболее термостойкие КСМ на основе ароматических полиамидов могут длительно эксплуатироваться при температуре до плюс 450 °С.

Основные недостатки – большой коэффициент термического расширения, низкие теплопроводность, термическая стойкость и стабильность.

В полимерных КСМ наиболее часто используют полиамиды с наполнителями – дисульфид молибдена, графит, нитрид бора и др. Хорошие результаты дает использование в качестве наполнителей порошков мягких металлов, алюминия, меди, никеля, молибдена и др.

КСМ на основе металлических материалов получают путем прессования и спекания из порошков металлов (железа, меди и пр.) с последующей пропиткой полученной пористой основы твердыми слоистыми смазками, мягкими металлами или полимерами. Для получения КСМ, работающих в особо тяжелых температурных условиях, в качестве основы используют никель, кобальт и их сплавы, в качестве наполнителя – материалы на основе молибдена или вольфрама.

Хорошие характеристики имеют КСМ на основе пористых материалов, изготовленных спеканием пакета спрессованных металлических сеток. Для увеличения антифрикционных свойств сетки можно изготавливать из мягких металлов. Механические свойства таких композиций широко регулируют выбором материала сетки и давления прессования. Получили распространение (например, для направляющих втулок клапанов ДВС) КСМ на металлической основе, поры

которых заполнены фторопластом-4 с добавками сульфидов, селенидов и теллуридов молибдена, вольфрама, ниобия и других металлов. В таких композициях твердая смазка кроме смазочного действия обеспечивает высокую несущую способность и износостойкость.

Рациональный подбор веществ, входящих в КСМ, обеспечивает их достаточно высокую несущую способность при хороших антифрикционных характеристиках и минимальном износе узла трения. Рабочая температура таких смазок ограничивается температурой течения материала металлической основы.

Для получения керамических матриц КСМ используют окислы бериллия, циркония и других металлов. КСМ на керамической основе обладают высокой термической и химической стойкостью. Основные недостатки этих материалов – хрупкость и низкая прочность при растяжении.

На основе КСМ разрабатывают узлы трения (вплоть до коренных вкладышей и поршневых колец), не требующие замены в течение всего моторесурса двигателя. При условии достаточно эффективного отвода теплоты узлы трения на основе КСМ могут длительно работать без дополнительного подвода смазки. Большинство КСМ хорошо работает совместно с жидкими и консистентными смазками, что открывает возможность их использования для подшипников скольжения в конструкциях ДВС. Это обеспечивает существенное повышение надежности двигателя, особенно в режиме масляного голодания. Для вкладышей коренных и шатунных подшипников можно использовать, например, композиции из медно-молибденового материала. Для подшипников распределительного вала применяют вкладыши, изготовленные из металлокерамических (или пористых) композиций на основе мягких металлов, насыщенных фталоцианиновой твердой смазкой.

8.9. Самосмазывающиеся материалы

Чтобы обеспечить малый коэффициент трения и малую интенсивность изнашивания, согласно молекулярно-механической теории трения, необходимо создать положительный градиент механических свойств, при котором прочность возникающих в зоне трения молекулярных связей должна быть меньше прочности нижележащих слоев трущихся деталей. Иными словами, прочность пленок, покрывающих поверхности раздела двух трущихся тел, должна быть ниже прочно-

сти основного материала этих тел. Это достигается нанесением на поверхность трения жидких, консистентных или твердых смазочных материалов, так как прочность на сдвиг слоев смазочного материала значительно ниже, чем металлов пары трения.

В паре трения такой градиент может быть достигнут следующими способами: нанесением пленки; применением самосмазывающегося монолитного материала, который в процессе трения также обеспечивает положительный градиент механической прочности за счет архивного наполнителя или выдавливания смазочного материала; применением смолы с твердым смазочным материалом. С ростом температуры в зоне трения все эти явления усиливаются.

К технологическим достоинствам самосмазывающихся полимерных материалов относятся:

- практически неограниченные запасы сырья;
- меньшие капиталовложения в производство, чем для производства металла;
- возможность изготовления деталей высокопроизводительными методами без снятия стружки (отходы в 5 раз меньше, чем у металла);
- низкая трудоемкость (в 5...10 раз меньше, чем у металла).

Преимущества самосмазывающихся материалов при эксплуатации заключаются в следующем:

- упрощение конструкции узлов трения, поскольку отпадает необходимость в сложных системах смазывания;
- снижение трудоемкости обслуживания (отпадает необходимость в периодической профилактической смазке, замене или доливке смазочного материала);
- обеспечение надежной смазки в условиях хранения;
- более широкий, чем у жидких смазочных материалов, диапазон рабочих температур.

К недостаткам самосмазывающихся полимерных материалов относятся:

- более высокий, чем при гидродинамической смазке, коэффициент трения (примерно равен коэффициенту трения при граничной смазке);
- ухудшение отвода тепла из зоны трения из-за отсутствия циркуляции жидкого смазочного материала.

Основным направлением в разработке самосмазывающихся полимерных материалов является создание многокомпонентных систем. Подбор соотношения компонентов в этих системах определяется ус-

ловиями работы (режимом трения, несущей способностью, средой эксплуатации), технологичностью получения материала и экономической целесообразностью его использования.

В условиях вакуума, в которых самосмазывающиеся полимерные материалы имеют большую скорость газовыделения, применяют металлокерамические материалы или материалы с рабочим слоем твердого смазочного материала.

Металлокерамические самосмазывающиеся материалы либо пропитывают жидким смазочным материалом, либо в их состав вводят твердые смазочные материалы. Последние можно также вносить на поверхность металлокерамических материалов.

Существует особый класс теплостойких самосмазывающихся материалов, предназначенных для работы в вакууме, на поверхности трения которых создается рабочий слой твердого смазочного материала.

Наиболее распространенные отечественные самосмазывающиеся материалы АМАН-2, АМАН-4, Эстеран-33 в паре трения со сталью имеют коэффициент трения 0,1 и максимальную рабочую температуру до 300...350 °С.

Контрольные вопросы к разделу 8

1. Назначение смазочных материалов.
2. Виды смазки.
3. Классификация масел по происхождению.
4. Классификация масел в зависимости от области применения.
5. Требования, предъявляемые к смазочным материалам.
6. Что такое физико-химические характеристики смазочных материалов? Назовите их.
7. Что такое вязкость смазочного материала?
8. Что такое присадка?
9. Классификация присадок по определяющему свойству.
10. Моторные масла. Группы моторных масел.
11. Классификация моторных масел по SAE и API.
12. Назначение трансмиссионных и промышленных масел.
13. Масла специального назначения.
14. Что такое пластичные смазочные материалы? Их классификация.
15. Что такое твердые смазочные материалы? Приведите примеры твердых смазочных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Триботехника – наука молодая. Сформировалась в шестидесятых годах прошлого века и на сегодняшний день бурно развивается. Этапы ее развития связаны с развитием различных отраслей промышленности и техники. Развитие конструкций машин происходит при постоянном стремлении к увеличению их производительности.

Триботехнические явления должны учитываться при проектировании и эксплуатации машин и механизмов. Потери средств от трения и износа в развитых странах составляют 4–5% национального дохода, а преодоление сопротивления трения поглощает во всем мире 20–25% вырабатываемой за год энергии. За полный цикл эксплуатации машин эксплуатационные расходы, затраты на ремонт и запасные части в несколько раз превышают затраты на изготовление новой техники.

Повышение долговечности и надежности машин, технологического оборудования и инструмента непосредственно связано с повышением износостойкости. Решение этой актуальной и практически необходимой задачи возможно только на базе глубоких, научно обоснованных решений. Управление трением, правильный выбор материалов по критериям трения и износостойкости, рациональное конструирование узлов трения и деталей машин и оптимизация условий эксплуатации могут существенно продлить срок жизни и повысить эффективность машин, снизить вредное экологическое воздействие.

Задача повышения долговечности узлов трения крайне усложняется каждый год. Развитие науки, техники и технологии обязательно ведет к ужесточению и усложнению режима работы машин, а значит, узлов трения и деталей по нагрузкам, скоростям, температурам, вибрации и т.д. Хорошо известно также, что стремление снизить материалоемкость машин приведет к уменьшению габаритов и удельных массовых характеристик узлов трения, которые еще более усложнят задачу. Важное значение приобретают работы по изнашиванию узлов трения и деталей автоматизированных и программированных устройств, особенно для роботов и манипуляторов.

Необходимо отметить, что триботехника как наука, позволяет решать такие национальные проблемы, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, повышение надежности и безопасности механических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анухин, В.И.* Допуски и посадки: учеб. пособие. / *В.И. Анухин.* – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 84 с.
2. *Беркович, И.И.* Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учеб. для вузов / *И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский;* под ред. *Д.Г. Громаковского.* – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2000. – 268 с.
3. *Гаркунов, Д.Н.* Триботехника. Износ и безызносность: учеб. для вузов / *Д.Н. Гаркунов.* – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
4. *Демкин, Н.Б.* Контактное состояние шероховатых поверхностей: учеб. пособие / *Н.Б. Демкин.* – М.: Наука, 1970. – 226 с.
5. *Крагельский, И.В.* Основы расчетов на трение и износ: учеб. для вузов / *И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. *Крагельский, И.В.* Трение, изнашивание и смазка: справ.: в 3 т. / *И.В. Крагельский, В.В. Алисин.* – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 400 с.
7. *Некрасов, С.С.* Обработка металлов резанием: учеб. для вузов / *С.С. Некрасов.* – М.: Агропромиздат, 1988. – 336 с.
8. Основы трибологии / под ред. *А.В. Чичинадзе.* – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
9. *Погодаев, Л.И.* Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин: учеб. для вузов / *Л.И. Погодаев.* – СПб.: Изд-во СПГУВК, 1997. – 415 с.
10. *Решетов, Д.Н.* Надежность машин: учеб. для вузов / *Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев.* – М.: Высш. шк., 1988. – 240 с.
11. Справочник по обработке металлов резанием / *Ф.Н. Абра, В.В. Коваленко, В.Е. Любимов* [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 239 с.
12. Трение, износ и смазка. Трибология и триботехника: учеб. для вузов / *А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун;* под ред. *А.В. Чичинадзе.* – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

Редактор В.А. Сорокина

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 8.10.2013 Формат 60x84/16 Бумага тип. № 1.

Печать – ризограф. Усл. печ. л. 12,0 Тираж 110 экз. Заказ № 754

Издательство Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117