

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

И.Ш. Тавтилов, В.И. Юршев, А.С. Кириленко

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Учебное пособие

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение

Оренбург
2021

УДК 620.179.112
ББК 34.41
Т13

Рецензент – кандидат технических наук, доцент, М.А. Корнипаев

Тавтилов, И. Ш.
Т13 Основы теории трения и изнашивания : учебное пособие /
И.Ш. Тавтилов, В.И. Юршев, А.С. Кириленко ; - 2-е изд., перераб.
и доп.; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2021. – 192 с.
ISBN

Учебное пособие состоит из двух частей: конспекта лекций и 9 лабораторных работ по дисциплине «Основы теории трения и изнашивания и триботехнические испытания». Каждая работа включает изложение основных положений теории, описание аппаратуры, оборудования, материалов и методики подготовки, проведения работы и испытаний, порядка обработки полученных результатов, а также содержит требования к составлению отчёта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Сборник предназначен для освоения дисциплины и выполнения лабораторных работ по курсу «Основы теории трения, изнашивания и триботехнические испытания», предусмотренному основной образовательной программой высшего образования для обучающихся по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, и может быть полезен обучающимся по тем направлениям подготовки, где изучаются основы трибологии.

ISBN

УДК 620.179.112
ББК34.41

© Тавтилов И.Ш.,
Юршев В.И.,
Кириленко А.С., 2021
© ОГУ, 2021

Содержание

Введение	6
Теоретическая часть	7
1 Поверхность твёрдого тела и контактирование шероховатых поверхностей	7
1.1 Структура поверхностного слоя	7
1.2 Жидкости, ПАВы, газы. Особенности их поведения на поверхности трения	9
1.3 Качество и топография поверхностей твёрдых тел	13
1.4 Контактирование шероховатых поверхностей и сближение между поверхностями твёрдых тел	14
1.5 Площадь фактического контакта. Насыщенный и ненасыщенный контакт	15
2 Виды, характеристики, законы, основные теории внешнего трения	16
2.1 Понятие о внешнем трении	16
2.2 Характеристики внешнего трения	16
2.3 Классические законы трения	18
2.4 Общие теории трения	19
3 Определение основных характеристик внешнего трения	20
3.1 Предварительное смещение твердых тел	20
3.2 Контактное предварительное смещение при упругих деформациях в зонах контактов микронеровностей	21
3.3 Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта при сдвиге при пластических деформациях	23
3.4 Соотношение между фактическими площадями касания и сближениями в контакте при скольжении	25
3.5 Силы и коэффициенты внешнего трения при упругих деформациях в зонах контактов микронеровностей	26
3.6 Силы и коэффициент внешнего трения при пластических деформациях в зоне контактов микронеровностей	27
3.7 Виды нарушения фрикционных связей и порог внешнего трения	29
4 Трение при различных видах смазки	32
4.1 Виды смазки	32
4.2 Трение при жидкостной смазке	32
4.3 Температурная стойкость граничных смазочных слоев	34
4.4 Трение при граничной, полужидкостной (смешанной) и газовой смазке	35
4.5 Газодинамическая, газостатическая смазка	36
4.6 Трение при твердой смазке	36
4.7 Самосмазывающиеся материалы	37
5 Влияние различных факторов на коэффициент внешнего трения	38
5.1 Факторы, влияющие на коэффициент внешнего трения	38
5.2 Трение в экстремальных условиях	42
5.3 Эффект аномально низкого трения	43
6 Динамические процессы при трении. Трение качения	43
6.1 Динамические модели трения скольжения	43
6.2 Фрикционные автоколебания	48
6.3 Вибрационное сглаживание и реверсивное трение	49

6.4 Характер взаимодействия контактирующих тел	52
7 Особенности трения различных материалов	53
8 Внутреннее трение	56
8.1 Внутреннее трение в твёрдых телах	56
8.2 Внутреннее трение в жидкостях и газах (вязкость)	57
8.3 Методы определения внутреннего трения	59
8.4 Основные теории внутреннего трения	60
8.5 Внутреннее трение в газах	63
9 Основные понятия и определения, относящиеся к физике и механике изнашивания	63
9.1 Общие понятия, виды и характеристики изнашивания	63
9.2 Классы и разряды износостойкости	65
9.3 Механизмы и стадии изнашивания	66
9.4 Механизм изнашивания металлических поверхностей	66
9.5 Механическое изнашивание эластомеров	70
9.6 Стадии изнашивания пар трения	71
10 Измерение износа и его распределение между деталями	74
10.1 Измерение износа и расчёт характеристик изнашивания	74
10.2 Распределение износа между деталями	76
11 Теории изнашивания	80
11.1 Физико-механические модели износа при усталостной и энергетической теориях	80
11.2 Модель усталостного разрушения поверхностей при изнашивании	81
11.3 Разработка новой теории трения и безызносности	82
11.4 Методы повышения износостойкости деталей машин	83
12 Трещинообразование на поверхностях трения	87
12.1 Усталостное изнашивание металлического антифрикционного слоя подшипников скольжения	87
12.2 Трещинообразование: причины, последствия и меры по предотвращению	88
12.3 Разрушение поверхности при контактных нагрузках	89
12.4 Связь сопротивления усталости деталей с трением и изнашиванием	91
13 Влияние различных факторов на интенсивность изнашивания	92
13.1 Влияние нормальной нагрузки	92
13.2 Влияние топографии поверхности	92
13.3 Влияние механических свойств контактирующих поверхностей	93
13.4 Влияние фрикционных свойств поверхности	93
13.5 Влияние скорости скольжения и температуры зоны трения	93
13.6 Влияние смазывания зоны трибологического контакта на интенсивность изнашивания	97
13.7 Влияние агрессивной среды и вакуума на интенсивность изнашивания	98
13.8 Влияние условий эксплуатации и режима работы на интенсивность изнашивания	101
13.9 Сроки службы трущихся деталей и убытки от трения и изнашивания в машинах	103
14 Приработка и равновесная шероховатость	104

14.1 Основные процессы, протекающие при приработке	104
14.2 Изменение микрогеометрии при трении	104
14.3 Гипотезы образования микрорельефа	105
14.4 Факторы, влияющие на эффективность приработки	106
14.5 Расчет равновесной шероховатости	107
15 Эффект безызносности	108
15.1 Сущность эффекта безызносности	108
15.2 Механизм образования серповитной плёнки и её структура	109
15.3 Физические основы эффекта безызносности	112
15.4 Использование ЭБ в узлах трения	115
Практическая часть	118
16 Лабораторная работа № 1. Изучение видов износа	118
17 Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трения и параметров, влияющих на процессы изнашивания	130
18 Лабораторная работа № 3. Определение температурной зависимости удельной теплоёмкости материалов	138
19 Лабораторная работа № 4. Определение момента трения в подшипниках скольжения на приборе ДП16А	144
20 Лабораторная работа № 5. Лабораторные установки для испытаний материалов на трение и изнашивание	152
21 Лабораторная работа № 6. Определение триботехнических характеристик подшипника скольжения на машине трения	162
22 Лабораторная работа № 7. Методы измерения износа	167
23 Лабораторная работа № 8. Паспортизация деталей и узлов эксплуатационных машин	173
24 Лабораторная работа № 9. Шероховатость поверхности и её измерение	177
Список использованных источников	192

Введение

Трение – уникальный феномен природы. Оно подарило человечеству тепло, огонь, возможность в короткое время остановить поезд или автомобиль, ускорить химическую реакцию, записать человеческий голос на пластинку, услышать звуки скрипки и многое другое.

Его изучали да Винчи и Кулон, Эйлер и Рейнольдс, Ломоносов и Менделеев, от античности до наших времен. До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. При трении (и только при трении) одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может, как упрочнить, так и разупрочнить металл, как повысить, так и понизить содержание в нем углерода, как наводородить, так и обезводородить поверхность изделия, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью и весьма «разумно» протекают явления направленные на разрушение поверхности, или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих трение и износ.

Сегодня с трением связана одна из проблем современности – износ машин и механизмов. Расходы на восстановление машин в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Удлинение срока службы машин даже в небольшой степени равноценно вводу значительных новых производственных мощностей. Вопросы повышения срока службы давно привлекли внимание инженеров. При решении проблем, связанных с долговечностью, были разработаны конструктивные и технологические мероприятия по повышению срока службы машин и созданы рациональные методы по уходу за ними, были разработаны методы и приспособления для проведения трибологических испытаний, предложены методики расчета элементов трибосопряжений по фактору износа, а также на основе достижений науки были заложены основы учения о трении и изнашивании машин.

Данный сборник лабораторных работ предназначен для практического изучения некоторых основных методик, позволяющих проводить испытания на трение и износ, а также конструкций машин, применяемых при проведении трибологических исследований.

Теоретическая часть

1 Поверхность твёрдого тела и контактирование шероховатых поверхностей

1.1 Структура поверхностного слоя

Под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренних слоёв. Толщина такого слоя колеблется в широких пределах (от 0,2 до 10^4 нм) и его свойства кардинальным образом влияют на трибологический процесс.

Поверхность твёрдого тела имеет избыточную поверхностную энергию. Это связано с особым состоянием атомов в поверхностном слое, при котором их силовые поля компенсируются лишь частично в результате взаимодействия с подобными им атомами, расположенными ниже.

Это обусловлено тем, что внутри твёрдого тела каждый атом кристалла окружён другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. В связи с этим в поверхностном слое у атомов твёрдого тела остаются свободные связи, наличие которых создаёт вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение. Чтобы в таком несимметричном силовом поле атом кристалла находился в равновесии, необходимо иное, чем внутри кристалла, расположение атомов самого верхнего слоя.

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри твёрдого тела. Избыток энергии, отнесенной 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 твёрдых тел. Она во многом определяет свойства высокодисперсных систем-коллоидов.

Явление образования на поверхности твёрдого тела тончайших плёнок газов, паров или растворённых веществ либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют адсорбцией.

В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твёрдого тела с силовыми полями молекул газа, движущихся к твёрдой поверхности, или взаимодействия жидкости, соприкасающейся с твёрдым телом, поверхность последнего покрывается плёнкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворённых в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твёрдого тела.

Если имеется химическое сходство среды с атомами тела, то устанавливаются более прочные химические связи. В этом случае процесс называется хемосорбция.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно-активные вещества, т. е. вещества, молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности (например, органические кислоты, их металлические мы-

ла, спирты и смолы). Характерной особенностью поверхностно-активных веществ является несовпадение центров тяжести положительных и отрицательных зарядов в их молекулах даже в изолированном состоянии; иначе говоря, в их молекулах существуют как бы два противоположных пространственно разделенных заряда. Такие молекулы, называемые полярными, притягиваются и удерживаются поверхностью тела.

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. Адсорбция бывает физическая и химическая. При химической адсорбции (хемосорбции) полярные концы молекул, связываясь с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный с химическим соединением. Подвижность молекул в результате этого значительно уменьшается.

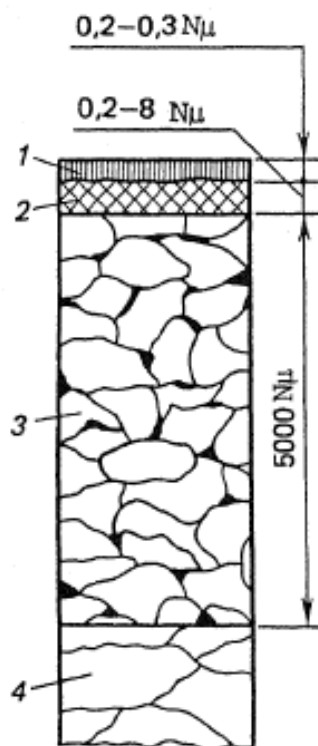
Хемосорбция, в отличие от физической адсорбции, носит избирательный характер; она протекает с большой интенсивностью в местах нарушения регулярности кристаллической решетки.

Поверхность твёрдого тела всегда покрыта различными плёнками (продуктами коррозии), т.к. большинство металлов вступает во взаимодействие с кислородом, в результате чего образуются плёнки толщиной до 10 нм. Роль этих плёнок в трибологии исключительно велика, в большинстве своём они снижают трение и уменьшают адгезию. Трение будет зависеть от того, насколько быстро восстанавливаются разрушающиеся при изнашивании плёнки.

При контактном взаимодействии твёрдых тел надо учитывать не только объёмы, но и механические свойства материалов. К таким свойствам относят: модуль упругости, предел прочности, коэффициент Пуансона. Поверхностные свойства, из-за сложности из определения, характеризуются интегральными величинами – твёрдость.

При определённых технологических процессах обработки верхняя часть поверхностного слоя может отличаться от остаточного объёма. Структура цельного материала обычно имеет аморфное состояние. Впервые этот слой был обнаружен Бейльби (рисунок 1.1). Этот слой состоит из большого числа различно ориентированных очень мелких кристаллов размером в несколько элементарных атомных ячеек. Этот слой характеризуется очень высокой адсорбционной активностью.

Следовательно, формирование поверхностного слоя происходит под влиянием поверхностной энергии внешней среды, а сама структура поверхностного слоя предопределяет трибологические процессы поверхностного слоя.



1 – адсорбированные газы, молекулы ПАВ толщиной до 100 нм; 2 – слой оксидов толщиной до 10 нм; 3 – слой Бейльби до 1000 нм; 4 – слой деформированных кристаллов толщиной от 1.5 до 200 мкм.

Рисунок 1.1 – Структура поверхностного слоя

Качество поверхности определяется геометрией поверхности как границей тела и физико-химическими свойствами, обусловленными процессом её образования при обработке детали.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышений и впадин с шагом волны, значительно превышающим её высоту.

Реальная поверхность не является гладкой, она имеет неровности: выступы и впадины с относительно малым расстоянием между ними. Эти неровности, образующие в совокупности рельеф поверхности, называют шероховатостью поверхности.

1.2 Жидкости, ПАВы, газы. Особенности их поведения на поверхности трения

Газы представляют собой конгломерат хаотически движущихся молекул, обладающих кинетической энергией. Характерными признаками являются – сжимаемость и текучесть. Поведение реальных газов описывается уравнением Ван-Дер-Ваальса

$$(p+p')(v-b) = RQ,$$

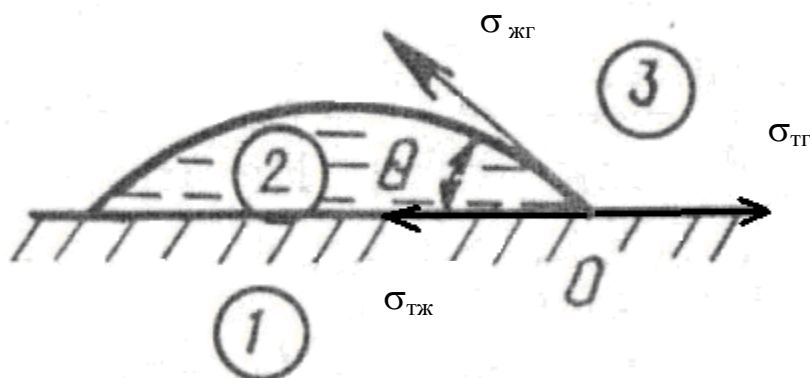
где p, v, Q – давление, объём и температура газа;
 b – объём собственных молекул газа;
 p' – молекулярное давление внутри газа;
 R – универсальная газовая постоянная.

Жидкости занимают промежуточное состояние между твёрдыми телами и газами. В них отмечается некоторая упорядоченность близкого порядка. Молекулы в них занимают не строго фиксированное положение, а имеют возможность перемещаться из одного узла в другой. Объёмные свойства подчиняются уравнению

$$p'(V-b) = RQ$$

Поверхностный слой жидкости отличается от объёмного состояния обладанием поверхностной энергией, которая характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ .

Адгезионное взаимодействие между жидкостью и твёрдым телом по границе их раздела определяется энергией (рисунок 1.2).



1 – твердое тело; 2 – жидкость; 3 – газ.

Рисунок 1.2 – Схема действующих сил поверхностного натяжения на границе раздела фаз

$$W_{ад} = \sigma_{TG} + \sigma_{JG} + \sigma_{TJ},$$

где σ_{TG} ; σ_{JG} ; σ_{TJ} – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела тело-газ, жидкость-газ и тело-жидкость.

Одним из важнейших свойств жидкости, определяющих их поведение на поверхности твёрдых тел является смачиваемость – способность жидкости растекаться по поверхности. Она характеризуется краевым углом смачивания.

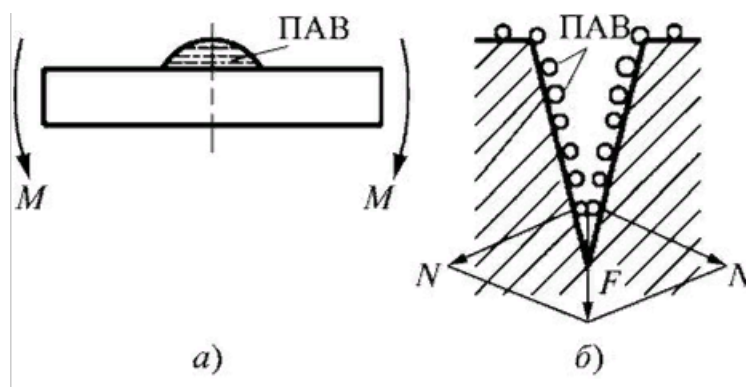
$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ТЖ}}}{\sigma_{\text{ЖТ}}}$$

Если угол смачивания $> 90^\circ$, то это плохое смачивание. Если угол смачивания $< 90^\circ$, то хорошее смачивание.

ПАВ (поверхностно-активные вещества) – это вещества, молекулы которых ориентируются перпендикулярно к поверхности твёрдого тела. Данная ориентация приводит к снижению поверхностной энергии, адсорбируясь в избыточном количестве в этом слое. Вещества, которые повышают энергию поверхности и стремятся покинуть её называются поверхностно-инактивными веществами (ПИАВ).

В трибологии роль ПАВ велика, они присутствуют почти во каждом смазочном материале и оказывают влияние на механические свойства тел.

В 1928 году П. А. Ребиндер открыл эффект адсорбационного снижения прочности (рисунок 1.3).



а – внешнее проявление эффекта; б – внутреннее проявление эффекта.

Рисунок 1.3 – Проявление эффекта Ребиндера

Возьмём пластинку из цинка и приложим изгибающий момент N не превышающий пределов упругости. Поместив над пластинкой каплю жидкости ртути; при последующем нагружении при том же самом моменте, металл разрушается под каплей – это явление носит название «внешнее проявление эффекта Ребиндера. Капля ПАВ снижает адгезию, адсорбцию.

Поверхностно-активная среда значительно понижает сопротивление деформированию и разрушению твёрдых тел в результате физической (обратимой) адсорбции поверхностно-активных веществ. Для осуществления внешнего эффекта Ребиндера так же необходимо предварительное нагружение и подбор соответствующих ПАВ.

Внешний эффект происходит в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на внешней поверхности деформируемого твёрдого тела, что вызывает пластифицирование поверхности и снижение предела текучести, а также коэффициента упрочнения. В результате понижается поверхностная энергия твёрдого тела, что приводит к облегчению выхода дислокаций.

Внутренний эффект вызывается адсорбцией поверхностно-активных веществ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформирования твёрдого тела. Этот эффект заключается в адсорбции атомов поверхностно-активных веществ на поверхностях микротрещин при деформации и разрушении твёрдого тела. Трещины быстрее развиваются в результате уменьшения работы, затрачиваемой на образование новой поверхности.; ПАВ проникает в устье трещин, что приводит к проявлению эффекта расклинивания. Давление в таких трещинах может достигать 1 Гпа.

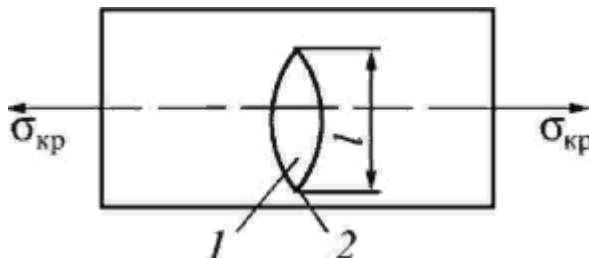
Отличительной особенностью эффекта Ребиндера является то, что он проявляется только при совместном действии среды и определённого напряжённого состояния.

Работы П.А. Ребиндера по времени совпали с работами А. Гриффитса, который в те же годы предложил одну из первых физических моделей прочности технических металлов (рисунок 1.4). Он обратил внимание на два факта: практическая прочность металлов значительно ниже их теоретической прочности; в объеме металла имеется большое количество дефектов в виде внутренних и внешних трещин.

А. Гриффитс предположил, что разрушение твердого тела будет иметь место, когда приложенное к нему растягивающее напряжение достигнет критического значения, вызывающего перенапряжение в вершине трещины, равное теоретической прочности металла.

$$\sigma_{\text{теор}} = \beta \cdot \sigma_{\text{крит}},$$

где β – коэффициент концентрации напряжения.



1 – трещина; 2 – концентратор напряжений

Рисунок 1.4 – Физическая модель прочности технических металлов (модель Гриффитса)

$$\sigma_{\text{крит}} = \alpha \sqrt{\frac{EW}{l}}$$

где E – модуль упругости материала;

W – поверхностная энергия, численно равная коэффициенту поверхностного натяжения σ ;

l – длина трещины;

α – коэффициент пропорциональности.

Гипотеза А. Гриффитса впоследствии была экспериментально подтверждена. Его модель получила дальнейшее развитие, органично сочетаясь с работами П.А. Ребиндера. Действительно, ПАВ, проникая в различные трещины, снижают величину поверхностной энергии W , а значит, и предельные критические напряжения, вызывающие разрушение материала.

1.3 Качество и топография поверхностей твёрдых тел

В условиях эксплуатации машин и приборов внешним воздействиям в первую очередь подвергается поверхность детали. Износ трущихся поверхностей, зарождение трещин усталости, коррозионное разрушение — это процессы, протекающие на поверхности деталей и в некотором прилегающем к поверхности слое. Под термином «поверхностный слой», или «металла поверхностный слой», понимается сама поверхность и ее некоторый подповерхностный слой, отличающийся по структуре и свойствам от материала всей детали.

Качество поверхности — это совокупность всех служебных свойств поверхностного слоя материала. Качество поверхности определяется двумя группами характеристик.

Параметры, характеризующие качество поверхности:

- геометрические параметры (характеризуются макрогеометрией, шероховатостью (микрогеометрией), субмикрогеометрией) (рисунок 1.5).
- физико-механические свойства (характеризуются микротвердостью, остаточными напряжениями, микронапряжениями, субмикронапряжениями).

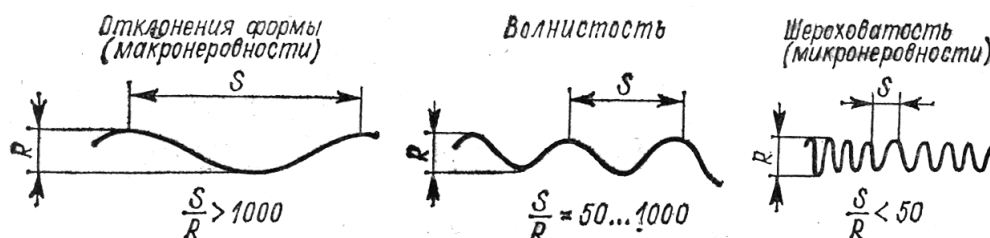


Рисунок 1.5 – Геометрические параметры, характеризующие качество поверхности

Отклонение формы (макрогеометрии) возникает тогда, когда отношение $\frac{S}{R} > 1000$, где S – шаг неровности, R – высота.

Шероховатость — это совокупность неровностей с относительно малым шагом (2-800 мкм) и высотой $R = 0.025-320$ мкм, образующих рельеф поверхности и рассматриваний по окружности базовой длине l от 80-8000 мкм.

Шероховатость характеризуется следующими параметрами:

- 1) Среднее арифметическое отклонение поверхности от средней линии — R_a
- 2) Высота неровностей профиля по поверхности — R_z

3) Наибольшая высота неровностей – $R_{\max}$. Расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины.

Профилограмма представляет собой увеличенный профиль шероховатой поверхности. Её можно получить посредством использования приборов под названием профилографы, а числовое значение с помощью профилометров различных моделей.

Важной характеристикой контакта является кривая опорной поверхности (рисунок 1.6), которая характеризует распределение материала по высоте шероховатости слоя. Для её построения профилограмму разбивают на ряд горизонтальных уровней параллельных средней линии, которые далее суммируют. Кривые опорной поверхности чаще всего строятся в относительных единицах.

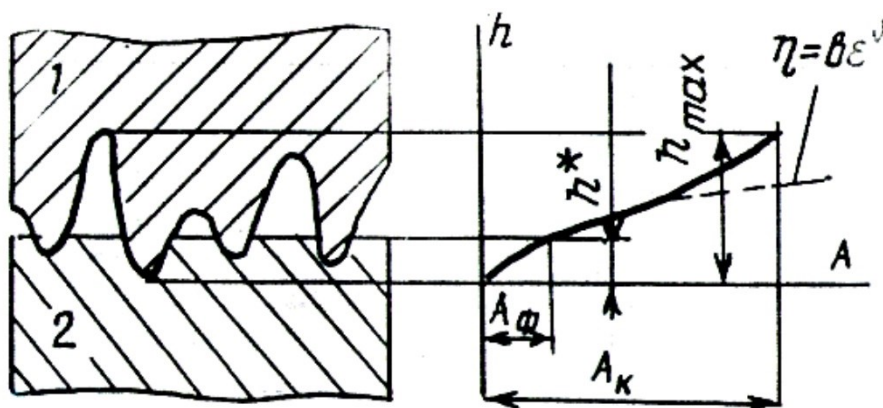


Рисунок 1.6 – Кривая опорной поверхности и определение деформируемого объема материала

1.4 Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей и сближение между поверхностями твёрдых тел

Когда две поверхности вступают в контакт, выступы поверхностей под действием приложенной нагрузки деформируются упруго и пластически.

При контактировании шероховатой поверхности с гладкой сначала соприкасаются наиболее высокие выступы, затем, по мере сближения поверхностей, в контакт вступает большее число всё меньших выступов. С возрастанием нагрузки, воспринимаемой выступами, происходит упругая деформация волн, на которых расположены микронеровности. Если контактирует менее твёрдая шероховатая поверхность с более твёрдой гладкой, то выступы шероховатой поверхности расплющиваются, если же гладкая поверхность имеет меньшую твёрдость, чем шероховатая, то выступы шероховатой поверхности внедряются в гладкую.

При контактировании двух шероховатых поверхностей (рисунок 1.7) первыми вступают в контакт те из них, которым противостоит на противоположной поверхности такой выступ, что сумма высот выступа первой поверхности и противолежащего ему выступа второй поверхности окажется наибольшей. По мере увеличения нагрузки в контакт вступают все новые пары противостоящих выступов, обладающие меньшей суммой высот. Образовавшаяся таким образом площадь контакта, со-

стоящая из площадок контакта отдельных пар выступов сопряженных поверхностей, составляет фактическую площадь контакта (ФПК). Площадки фактического контакта сгруппированы на вершинах деформированных волн в отдельных зонах, образующих контурную площадь контакта.

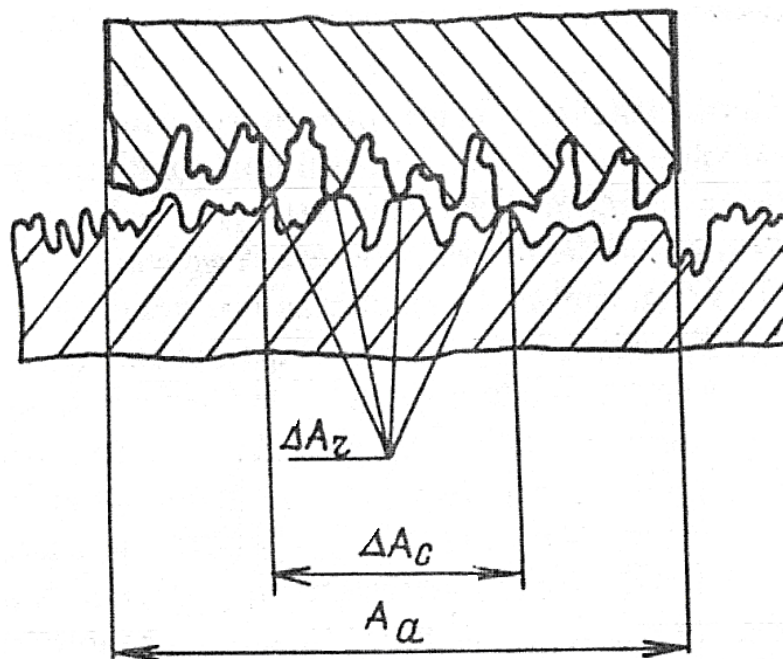


Рисунок 1.7 – Формирование номинальной A_d , контурной A_c и фактической площадей контакта при фрикционном взаимодействии твердых тел

1.5 Площадь фактического контакта. Насыщенный и ненасыщенный контакт

Для изучения ФПК был разработан метод тонких угольных плёнок, напыляемых в вакууме на одну из контактирующих поверхностей. Такие пленки весьма однородны, имеют малую толщину (0,03-0,5 мкм) и легко разрушаются в местах контакта. Площадь контакта, полученная по методу тонких угольных пленок, планиметрируется и автоматически подсчитывается.

Другим часто используемым методом определения фактической площади контакта является метод нарушения полного внутреннего отражения. При этом шероховатая поверхность контактирует со стеклянной или алмазной призмой. На призму падает пучок света, испытывающей на грани полное внутреннее отражение, в местах контакта выступов поверхностью призмы отражение нарушается, и наблюдатель видит на зеркальном фоне темные пятна фактического контакта. Площадь контакта определяется с помощью фотометрического устройства.

Ненасыщенный контакт – это такая разновидность контактирования твердых тел, когда число контактирующих микронеровностей меньше числа микронеровностей расположенных на контурной площади касания. Если же выполняется противоположное условие, то такой контакт называется насыщенным. К тому же, если происходит упругое, либо пластическое деформирование выступов контактирую-

щих поверхностей при соответствующих контактах наблюдается: упругий ненасыщенный контакт, пластический ненасыщенный контакт, упругий насыщенный контакт, пластический насыщенный контакт.

2 Виды, характеристики, законы, основные теории внешнего трения

2.1 Понятие о внешнем трении

Внешнее трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательной к ним, и сопровождаемое диссипацией (рассеянием) энергии. Оно связано со сложным молекулярным кинетическим процессом, происходящим на поверхности (100 Н/м)

Различают следующие виды внешнего трения:

по наличию относительного движения:

- трение покоя;
- трение движения;

по характеру относительного движения:

- трение скольжения;
- трение качения;
- трение качения с проскальзыванием;

по наличию смазочного материала:

- трение со смазочным материалом;
- трение без смазочного материала;

Трением покоя называется трение двух тел при микросмещениях без макросмещения, т. е. при малом относительном перемещении тел в пределах перехода от покоя к относительному движению.

Трением движения называется трение двух тел, находящихся в относительном движении.

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

Трение качения — трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению по крайней мере в одной точке.

2.2 Характеристики внешнего трения

К основным характеристикам относят 7 характеристик:

- 1 Сила трения
- 2 Наибольшая сила трения покоя
- 3 Предварительное смещение
- 4 Скорость скольжения
- 5 Коэффициент трения

6 Коэффициент сцепления

7 Поверхность трение

Сила трения – это сила сопротивления относительно перемещению одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между двумя телами (рисунок 2.1).

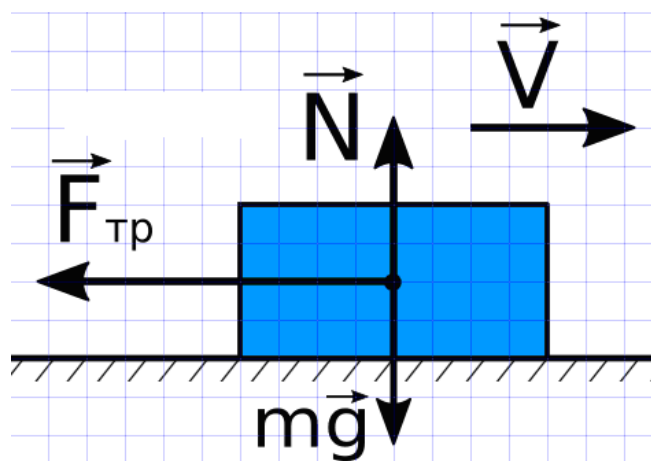
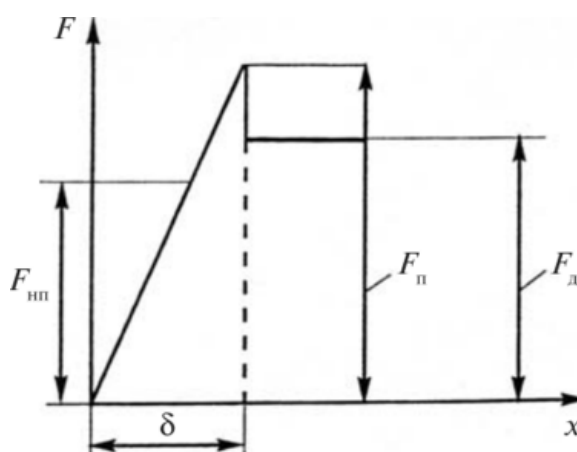


Рисунок 2.1 – Силы, действующие на твердое тело

Наибольшая сила трения покоя – сила трения покоя, любое превышение которой ведет к началу микросмещения.

Предварительное смещение – относительное микросмещение двух твердых тел в пределах от состояния покоя до начала относительного движения (рисунок 2.2).



$F_{\text{нп}}$ – наибольшая сила трения покоя; $F_{\text{п}}$ – сила трения покоя; $F_{\text{д}}$ – сила трения; δ – предварительное смещение

Рисунок 2.2 – Изменение силы трения в зависимости от величины перемещений

Величина смещения δ составляет от 0,5 до 8 мкм, в зависимости от природы сопряженных тел.

Скорость скольжения – это разность скоростей тел в точки касания при скольжении.

Коэффициент трения – отношение силы трения к нормальной силе, которая прижимает трущиеся тела к друг другу.

Коэффициент сцепления – это отношение наибольшей силы трения покоя к нормальной силе, прижимающей тела к друг другу.

2.3 Классические законы трения

Первой попыткой осмыслить природу трения были сделаны ещё Аристотелем. Значительный вклад в изучение причин трения внес Леонардо да Винчи. Обосновывая невозможность создания вечного двигателя, одной из причин этого он считал трение. Леонардо впервые ввел понятие коэффициента трения, показал, что сила трения зависит от материала соприкасающихся поверхностей, от качества их обработки, прямо пропорциональна нагрузке и может быть уменьшена путем установки роликов или введения смазочного материала между поверхностями трения. Он является изобретателем роликового и шарикового подшипников.

Его очерки вдохновили французов Г. Амонтона и Ш. Кулона провести эксперименты и сформулировать законы трения:

- 1) Сила трения пропорциональна нагрузке
- 2) Коэффициент трения не зависит от площади контакта
- 3) Статический коэффициент трения выше кинетического
- 4) Коэффициент трения не зависит от скорости скольжения

Классические законы существовали без значительных изменений, практически до настоящего времени. Поэтому можно полагать, что они в достаточной мере оправданы. Однако большинство законов оказались не точными, в то же время они дают удивительно полное представление о механизме трения без смазочного материала (сухое трение).

Первый закон справедлив во всех случаях за исключением высокого давления, при котором фактическая площадь контакта приближается к номинальной.

В 1699 г. Амонтон впервые сформулировал эмпирический закон линейной зависимости силы трения от нагрузки:

$$F = f N,$$

где f – коэффициент трения

N – сила нормальной реакции к плоскости трения нагрузка.

Кулон дополнил его:

$$F = f N + A,$$

где A – часть силы трения, зависящая от «сцепляемости» поверхностей трения и площади касания.

Второй закон оказался верным для материалов обладающих пределом текучести (металлы) и не применим к упругим и вязкоупругим материалам.

Третьему закону не подчиняется ни один упругий материал. В настоящее время нет единого мнения, относительно того, может ли вязкоупругий материал иметь коэффициент трения покоя.

Четвертый закон не справедлив ни для одного материала, хотя в случае с металлами его формулировка точнее.

Пятый закон – коэффициент трения зависит от материала. Однако, его можно рассматривать, скорее, как наблюдение первых исследователей. Поэтому он не был включён в первоначальный список классических законов.

2.4 Общие теории трения

а) Теория механического сцепления (геометрическая теория трения) – согласно этой теории, трение можно объяснить сцеплением микронеровностей шероховатых поверхностей. Этот механизм объясняет существование трения покоя, а также трения движения, как силу, необходимую для подъема неровности верхней поверхности, над неровностью нижней. При этом коэффициент трения численно определяется как тангенс угла наклона единичной неровности (Г. Амонтон, де ля Гир, Ш. Кулон, Л. Эйлер).

б) Теория молекулярного адгезионного притяжения – согласно этой теории, сила трения связывается с преодолением атомно-молекулярного взаимодействия между твёрдыми телами. Впервые гипотеза была выдвинута и подтверждена Д. Т. Дезагюлье, Гарди, Томлинсоном, которые объяснили появление силы трения диссипацией энергии, при вырывании атомов одного тела из зон притяжения атомов второго, т.е. это молекулярно-кинетический процесс разрушения связей, в котором энергия расходуется на растяжение, разрывание и релаксацию молекул.

в) Энергетическая теория трения – согласно этой теории, сила трения пропорциональна той работе внешних сил, которая затрачивается на реализацию различных физико-химических процессов на поверхности и внутри микрообъемов деформированных материалов (Л. Гюмбель, В.Д. Кузнецов, Г. Фляйшер). Разновидностью этой теории является теория электростатического притяжения; согласно которой, явление скачкообразного движения металлических поверхностей при трении, объясняется возбуждением потока электронов, создающих скопление зарядов противоположной полярности, на поверхности раздела. Эти заряды удерживаются на поверхности, вследствие электростатического напряжения.

г) теория сварки, среза, пропахивания – была предложена Ф. Боуденом, Д. Тейбором. По этой теории высокое давление, возникающее на отдельных пятнах касания, вызывает местную сварку, и, образующий таким образом спай, при скольжении срезается. А при пропахивании матрицей мягкого металла неровностей более твердого, возникает деформационная составляющая силы трения.

д) комбинированные теории трения – занимают особое место среди теорий трения, рассматривают трибологические процессы, как комбинацию различных факторов:

- преодоление сил сцепления между поверхностями и подъемом их по неровностям

- преодоление молекулярно-адгезионных связей между телами и взаимодействие между неровностями сопряженных тел.

Среди комбинированных теорий трения наиболее развитой является молекулярно-механическая теория сухого и граничного трения, выдвинутая И.В. Крагельским. Эта теория основана на предположении, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как преодолением сил межмолекулярного взаимодействия между контактирующими телами (силы молекулярного притяжения), так и преодолением механического сопротивления при пропахивании или контактировании поверхностей (взаимное внедрение отдельных выступов поверхности).

3 Определение основных характеристик внешнего трения

3.1 Предварительное смещение твердых тел

Зона, в которой происходит плавное нарастание силы трения соответствует микросмещению или предварительному смещению твердых тел. Анализ показывает, что смещение в общем случае будет равно:

$$\delta = \delta_{об} + \delta_{кон} ,$$

где $\delta_{об}$ – перемещение, обусловленное объемной деформацией контактирующих тел под действием приложенных внешних сил (рисунок 2.2);

$\delta_{кон}$ – перемещение, обусловленное изменением напряженно-деформируемого состояния в зоне контакта, вызванное приложением внешней тангенциальной силы, называется контактным предварительным смещением.

Объемное предварительное смещение зависит от величины приложенной внешней тангенциальной силы, размеров контактирующих твердых тел и их механических свойств.

$$\delta_{об} = \frac{\tau_1}{G_1} h_1 + \frac{\tau_2}{G_2} h_2 ,$$

где G_1, G_2 – модуль упругости на сдвиг материалов контактирующих тел;

h_1 – расстояние от точки приложения внешней силы до контактной плоскости (рисунок 3.1);

h_2 – расстояние от контактной плоскости до линии заделки второго тела (рисунок 3.1);

τ_1, τ_2 – касательные напряжения, возникающие в контактирующих телах под действием внешней силы.

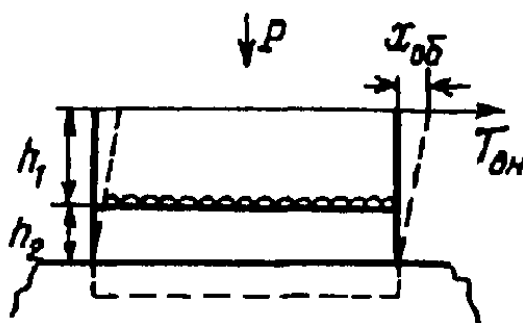


Рисунок 3.1 – Схема объемного предварительного смещения

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau = F_{\text{вн}}/A_a ,$$

где $F_{\text{вн}}$ – внешняя сила;

A_a – номинальная площадь касания контактирующих тел.

Контактное предварительное смещение зависит от вида деформации в зонах контактов микронеровностей.

3.2 Контактное предварительное смещение при упругих деформациях в зонах контактов микронеровностей

Размеры контактирующих тел таковы, что волнистостью их поверхностей можно пренебречь. Для описания шероховатой поверхности будем использовать ее сферическую модель. Будем полагать, что по механическим свойствам контактирующие тела отличаются настолько, что деформацией контактирующих микронеровностей жесткого тела можно пренебречь.

Так как фактическая зона касания формируется в зонах контактов микронеровностей, то рассмотрим процессы, происходящие в зоне контакта произвольной, имеющей сферическую форму поверхности, микронеровности при сдвиге. Под влиянием нагрузки микронеровность внедряется на величину h_i в поверхность менее жесткого тела (рисунок 3.2). Приложение сдвигающей силы T_i вызовет изменение напряженного состояния на контакте. В зоне контакта микронеровности с деформируемым материалом возникают связи, образующиеся в результате межатомных и межмолекулярных взаимодействий. По мере увеличения T_i возрастают касательные напряжения на границе раздела в зоне контакта микронеровность – деформированный материал. В тех участках зоны контакта, где касательные напряжения будут больше величины касательных напряжений, обусловленных прочностью на сдвиг связей, возникших в результате межатомных и межмолекулярных взаимодействий, происходит проскальзывание деформируемого материала относительно поверхности микронеровности.

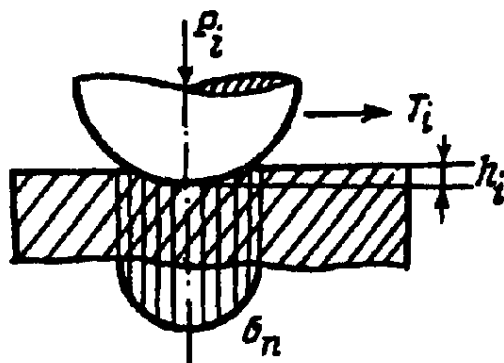


Рисунок 3.2 – Распределение напряжений при упругих деформациях в зоне контакта шара с плоской поверхностью деформируемого тела

Прочность на сдвиг связей зависит от нормальных напряжений, подчиняясь следующей закономерности:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \sigma_n,$$

где τ_0 , β – коэффициенты, зависящие от природы взаимодействия между частицами;

σ_n – нормальные сжимающие напряжения.

Минимальные значения σ_n достигаются у границы контактной зоны, в периферийных участках контактной зоны будет минимальной прочность на срез связей, возникающих в результате межатомных и межмолекулярных взаимодействий (рисунок 3.3).

Касательные напряжения τ , возникающие в зоне контакта от приложения внешней силы и обусловленные деформированием материала в зоне контакта, стремятся к бесконечности.

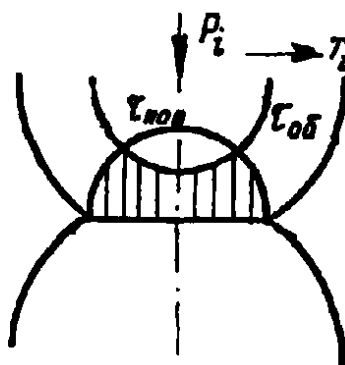


Рисунок 3.3 – Касательные напряжения, возникающие в зоне контакта от приложения внешней силы и обусловленные деформированием материала

Там где $\tau > \tau_n$, будет происходить проскальзывание деформированного материала относительно поверхности микронеровности. Поэтому при приложении сдви-

гающей силы на периферийных участках контакта будут образовываться кольцевые зоны, в которых произошло проскальзывание, и центральная зона, в которой проскальзывание отсутствует (рисунок 3.4).

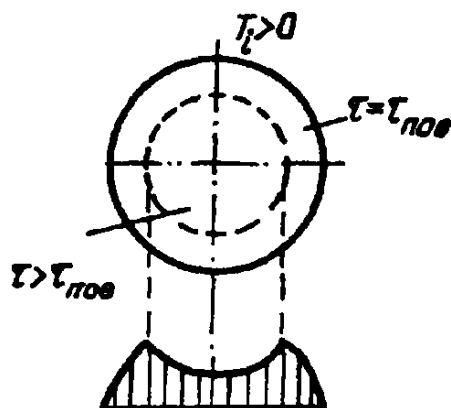


Рисунок 3.4 – Кольцевые зоны на периферийных участках контакта при проскальзывании

При увеличении сдвигающей силы площадь периферийной зоны будет возрастать, а центральной сокращаться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока при сдвигающей силе, равной по величине силе трения покоя, площадь центральной зоны станет равной нулю, и начнется макроскопическое скольжение.

Расстояние, на которое перемещается при этом микронеровность, равно контактному предварительному смещению $\delta_{\text{кон}}$. При упругих деформациях в зонах контактов микронеровностей контактное предварительное смещение зависит от физико-химического состояния поверхностей трения, качества их обработки, механических характеристик материала менее жесткого из контактирующих твердых тел.

3.3 Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта при сдвиге при пластических деформациях

На микронеровность действует внешняя сила P_i . Под действием этой силы микронеровность внедряется на величину h_i . Пластически деформируемый материал, вытесняясь из лунки, образует навалы (рисунок 3.5). Форма навалов переменная, однако объем материала в них равен объему материала, вытесненного из лунки. При этом микронеровность поддерживается деформированным материалом со всех сторон. Средние нормальные напряжения на контакте постоянны и равны твердости материала по Бринеллю, т.е.

$$P_{\text{сст}} = HB$$

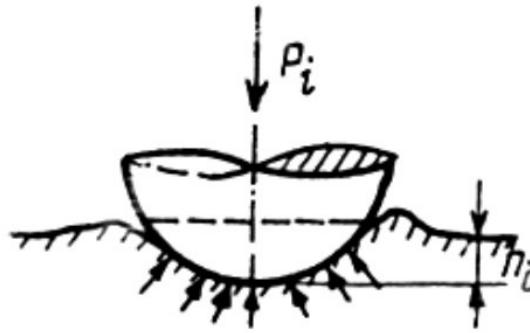


Рисунок 3.5 – Внедрение микронеровности в пластически деформируемый материал

При скольжении в случае идеально пластических деформаций в зонах касания соприкосновение микронеровности с деформируемым материалом осуществляется только по фронтальной части ее поверхности (рисунок 3.6). Величина внедрения будет равна $h_{\text{ск}}$.

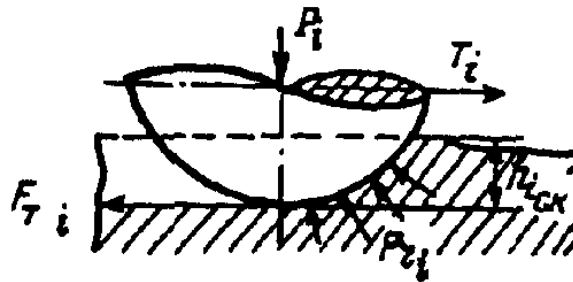


Рисунок 3.6 – Скольжение жесткой микронеровности по поверхности пластически деформируемого материала

При сдвиге происходит перераспределение фактической площади касания. Этим и будет обусловлено при пластических деформациях контактное предварительное смещение. Его величина будет равна расстоянию, проходимому микронеровностью в направлении скольжения, на котором заканчивается процесс перераспределения фактической площади касания.

Средние нормальные напряжения в этом случае, при $h_{\text{ск}}/R < 0,2$ (здесь R – радиус индентора), постоянны и равны

$$p_{\text{гск}} = HВ.$$

Следовательно, средние нормальные напряжения в статике и при скольжении равны

$$p_{\text{гст}} = p_{\text{гск}} = HВ.$$

3.4 Соотношение между фактическими площадями касания и сближения в контакте при скольжении

В неподвижном состоянии фактическая площадь касания её в зависимости от приложенной нагрузки равна

$$A_{\text{гick}} = P_i / p_{\text{гст}}.$$

При скольжении на микронеровность кроме силы P_i , будет действовать тангенциальная сила $|T_i| \approx |F_{\text{три}}|$. Следовательно, результирующая сила будет равна

$$Q_i = \sqrt{P_i^2 + T_i^2} = P_i \sqrt{1 + f^2},$$

где f – коэффициент трения.

Фактическая площадь касания при скольжении микронеровности будет равна

$$A_{\text{rec}} = \frac{Q_i}{p_{\text{re}} T} = \frac{P_i}{p_{\text{re}} T} \sqrt{1 + f^2};$$

$$A_{\text{rck}} = A_{\text{rcm}} \sqrt{1 + f^2}.$$

При пластических деформациях в зонах контакта внедрившихся микронеровностей фактическая площадь касания при скольжении в $\sqrt{1 + f^2}$ раз больше ее величины в неподвижном состоянии контактирующих тел, зависит от физико-химического состояния поверхностей контактирующих тел и реализуемого коэффициента трения.

$$h_{\text{ick}} = 2\sqrt{1 + f^2} h_{\text{icm}},$$

т.е. для единичной микронеровности в случае внедрения и пластических деформаций в зоне контакта величина внедрения микронеровности при скольжении более чем в 2 раза будет больше величины внедрения в статике. Это обусловлено тем, что в статике микронеровность опирается на симметрично вытесненный из лунки пластически деформированный материал. При скольжении опорной поверхностью является только фронтальная полуповерхность касания.

3.5 Силы и коэффициенты внешнего трения при упругих деформациях в зонах контактов микронеровностей

При упругом ненасыщенном контакте общая сила трения при скольжении абсолютно жесткого тела, обладающего шероховатой поверхностью относительно более мягкого тела, обладающего абсолютно ровной поверхностью, будет равна

$$F_{\text{тр}} = \int_0^{n_r} F_i dn_r,$$

где F_i – сила трения, возникающая на единичной произвольной микронеровности;

n – число микронеровностей, имеющих одинаковое внедрение.

Деформационная составляющая силы трения возникает вследствие несовершенной упругости материала деформируемых слоев. Она обусловлена гистерезисными потерями.

$$F_{i \text{ деф}} = \frac{0,25 \alpha_{\text{гист}} h_i^2 E}{1 - \mu^2},$$

где E – модуль упругости деформируемого материала;

μ – коэффициент Пуассона этого материала;

$\alpha_{\text{гист}}$ – коэффициент гистерезисных потерь материала в условиях сложного напряженного состояния.

Молекулярная составляющая силы трения обусловлена межатомными и межмолекулярными воздействиями и равна

$$F_{i \text{ мол}} = (\tau + \beta P_{\text{ги}}) \pi R h_i.$$

Тогда общую силу трения, возникающую при скольжении произвольной микронеровности

$$F_i = \frac{0,25 \alpha_{\text{гист}} h_i^2 E}{1 - \mu^2} + \left(t_0 + \frac{0,4 \beta E \sqrt{h_i}}{(1 - \mu^2) \sqrt{R}} \right) \pi R h_i.$$

Относительная величина сближения ε_i , v опорной кривой профиля поверхности, фрикционных параметров τ_0 и β . Минимальное значение коэффициента внешнего трения при упругих деформациях в условиях ненасыщенного контакта

$$f_{\text{min}} = \frac{2 \sqrt{t_0 \alpha_{\text{гист}}} (1 - \mu^2)}{k_1 v (v - 1) \sqrt{E(v + 1)}} + \beta.$$

Минимальное значение коэффициента внешнего трения практически не зависит от микротопографии поверхности и определяется только физико-химическим

состоянием поверхностей трения и механическими свойствами менее жёсткого из взаимодействующих тел.

$$f_{\min} = \frac{1,5 \sqrt{(1-\mu^2) t_0 \alpha_{\text{гист}}}}{\sqrt{E}} + \beta.$$

При возникновении упругого насыщенного контакта

$$F_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^{n_c} F_i \Delta n_c ;$$

$$F_{\text{тр}} = \left[t_0 + \frac{0,4 E \sqrt{\varepsilon_{\text{ср}}} h_{\text{max}}}{(1-\mu^2)\sqrt{R}} \right] \frac{A_c \varepsilon_{\text{ср}}}{2} + \frac{0,125 \alpha_{\text{гист}} A_c b \varepsilon_{\text{н}}^{\nu-1} \nu E h_{\text{max}} \sqrt{\varepsilon_{\text{ср}}}}{\pi R (1-\mu^2)},$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}$ – среднее относительное внедрение.

Нормальную нагрузку при упругом насыщенном контакте

$$P = \frac{0,2 A_c E b^{1/\nu} h_{\text{max}}^{1/2} \varepsilon_{\text{ср}}^{3/2}}{(1-\mu^2)\sqrt{R}}.$$

Коэффициент внешнего трения будет равен

$$f = \frac{2,4 \tau_0 (1-\mu^2) \sqrt{R}}{E \sqrt{h_{\text{ср}}}} + \beta + 0,2 \alpha_{\text{гист}} \left(\frac{h_{\text{ср}}}{2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Степень насыщенности контакта при упругих деформациях в зонах фактического касания микронеровностей не влияет на величину минимального коэффициента внешнего трения. Упругий насыщенный контакт может быть реализован только тогда, когда одна из контактирующих деталей изготовлена из материала, обладающего невысоким модулем упругости.

3.6 Силы и коэффициент внешнего трения при пластических деформациях в зоне контактов микронеровностей

При идеально пластических деформациях в зоне контактов микронеровностей последние при относительном скольжении будут пропахивать материал. При идеальных пластических деформациях величина касательных напряжений равна

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \text{ НВ}.$$

Силу внешнего трения можно определить как

$$F_{\text{тр}} = \int_0^{n_r} F_i dn_r = \frac{0,84 HB A_c b \nu (\nu-1) h_{\text{max}}^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{\nu}}{\pi r^{\frac{1}{2}}} \left[k_1 \varepsilon^{\frac{1}{2}} + \frac{\pi R^{1/2}}{1,68 h_{\text{max}}^{1/2}} \left(\frac{\tau_0}{HB} + \beta \right) \frac{1}{1 (\nu-1)} \right].$$

Нормальная нагрузка

$$P = 0,5 A_c b \varepsilon^{\nu} HB,$$

тогда коэффициент внешнего трения

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,55 \nu (\nu-1) k_1 \left(\frac{h}{R} \right)^{1/2}.$$

Молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения при пластических деформациях не зависит ни от микротопографии поверхностей, ни от возникающего в сопряжении контурного давления, а зависит только от физико-химического состояния поверхностей трения. Коэффициент трения находится

$$f = f_M + 0,55 \nu (\nu-1) k_1 \left(\frac{h}{R} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

При увеличении сближения между поверхностями взаимодействующих твёрдых тел в условиях пластического ненасыщенного контакта общий коэффициент трения возрастает за счёт увеличения деформационной составляющей коэффициента трения.

Пластический насыщенный контакт будет иметь место при контурных давлениях, изменяющихся в пределах $0,0625 HB \leq p_c \leq 0,11 HB$.

При пластическом насыщенном контакте

$$F_{\text{тр}} = A_c b \varepsilon_H^{\nu-1} [\nu \varepsilon - (\varepsilon - 1) \varepsilon_H] \left\{ \tau_0 + \beta HB + \frac{0,54 HB h_{\text{max}}^{1/2}}{\sqrt{\varepsilon^3 \nu R}} [\nu \varepsilon - (\nu - 1)^{\frac{1}{2}}] \right\};$$

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + \frac{0,54}{\frac{1}{\nu^2}} \left[\frac{\nu h}{R} + \frac{(1-\nu)h}{R} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

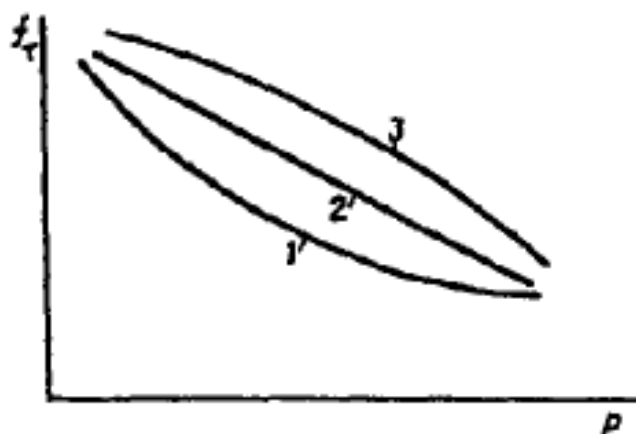
На выполнение условий внешнего трения существенное влияние оказывает физико-химическое состояние поверхностей взаимодействующих тел, механические свойства менее жёсткого из взаимодействующих тел и шероховатость поверхности более жёсткого твёрдого тела. Во многих реальных случаях коэффициент трения f снижается с ростом нагрузки P (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента внешнего трения f_T при пластическом насыщенном контакте от параметра ψ при $f_{\text{тмол}} = 0,1$

В приведённых выше формулах для расчётов f учитывается в первую очередь влияние нагрузки P , а так же, номинальное давление P_a и контурное давление P_c .

Как следует из проведенного анализа, в общем виде во многих реальных случаях при сухом и граничном трении коэффициент трения f , снижается с ростом нагрузки P (рисунок 3.8), что хорошо согласуется с основными положениями молекулярно-механической теории внешнего трения.



1 – сталь по чугуну; 2 – порошковый материал по чугуну; 3 – фрикционный полимерный материал по чугуну

Рисунок 3.8 – Зависимости коэффициента внешнего трения f_T от нагрузки P для различных пар трения без смазочного материала

3.7 Виды нарушения фрикционных связей и порог внешнего трения

В 1962 году И. В. Крагельский опубликовал классификацию видов фрикционных связей, основанную на характере взаимодействия и разрушения поверхностей.

Пятна касания, которые образуются, существуют и исчезают при совместном действии нормальных и тангенциальных сил, называются фрикционными связями.

Характер нарушения фрикционных связей зависит от ряда геометрических, механических и физико-химических связей, но наиболее мощным фактором являет-

ся отношение глубины внедрения (или величины сближения в контакте) к радиусу единичной неровности. Отношение $\frac{h}{R}$ позволяет различать упругий контакт, пластический контакт и микрорезание.

Вторым существенным фактором является физико-механический, который характеризуется отношением $\frac{\tau}{\sigma_T}$, где τ – тангенциальная прочность молекулярной связи; σ_T – предел текучести материала.

При внешнем трении различают два случая нарушения фрикционной связи:

1) По поверхности раздела двух тел или по пленкам, покрывающим эти тела.

2) Нарушение фрикционной связи происходит не по поверхности раздела двух тел, а в глубине основного материала. В этом случае внешнее трение переходит во внутреннее.

И. В. Крагельский, в предложенной им классификации для установившегося движения в условиях трения без смазки и приграничной смазки, различает пять видов нарушения фрикционной связи (рисунок 3.9).

Характер деформирования	Упругое оттеснение	Пластическое оттеснение (передетформирование)	Микрорезание	Адгезионное нарушение (разрушение схватывающихся пленок)	Когезионный отрыв (глубинное вырывание)
Схема					
Число циклов (n), приводящих к разрушению основы	$n \rightarrow \infty$	$1 < n < \infty$	$n \rightarrow 1$	$n \rightarrow \infty$	$n \rightarrow 1$
Условие осуществления	$h/R < 0,01$ – для черных металлов; $h/R < 0,0001$ – для цветных металлов	$h/R > 0,01$ – для черных металлов; $h/R > 0,0001$ – для цветных металлов	$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T}\right)$	$d\tau/dh > 0$	$d\tau/dh < 0$

Рисунок 3.9 – Основные характеристики фрикционных связей по И.В. Крагельскому

1) упругое оттеснение материала выступами контртела, которое встречается, когда напряжения в зоне контакта не превышают предела текучести. Разрушение материала (износ) в этом случае происходит в результате усталостных явлений;

2) пластическое оттеснение материала, которое происходит, если контактные напряжения достигают предела текучести, но материал обтекает внедрившиеся выступы контртела. Износ в этом случае будет результатом малоциклового пластического передеформирования (малоцикловая фрикционная усталость). Условия возникновения упругого или пластического оттеснения в определенной степени характеризуются ранее изложенными представлениями об упругом и пластическом контакте;

3) микрорезание, которое происходит при достижении контактными напряжениями или деформациями разрушающих значений (нарушается режим обтекания выступов деформируемым материалом). Износ происходит при однократном акте взаимодействия;

4) адгезионное нарушение фрикционной связи (разрушение схватывающихся пленок); оно не приводит непосредственно к разрушению, но влияет на величину действующих на контакте напряжений и деформаций, т. е. сопутствует усталостным процессам. Адгезионное нарушение происходит при прочности пленки, меньшей прочности основного материала, т. е. при положительном градиенте механических свойств $\frac{d\tau}{dh} > 0$;

5) когезионный отрыв, который возникает если прочность фрикционной связи (прочность пленки) выше прочности основного материала, т. е. при отрицательном градиенте механических свойств $\frac{d\tau}{dh} < 0$. В этом случае износ происходит в результате глубинного вырывания при однократном воздействии.

При трении в условиях пластического контакта происходит обтекание пластически деформируемым материалом поверхности одиночной неровности более твердого тела. При определенных значениях h/R и сдвигового сопротивления τ/σ_T вызванного адгезионным взаимодействием тел перед неровностью материала образуется застойная зона и меняется характер фрикционного взаимодействия на контакте: пластическое оттеснение материала переходит в микрорезание, а внешнее трение переходит во внутреннее. Такое критическое состояние на контакте называется порогом внешнего трения.

Условия его возникновения определяется:

$$h/R = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\pi}{\sigma_T} \right),$$

где τ – касательное напряжение среза адгезионной связи;

σ_T – предел текучести материала.

Если под действием нагрузки величина h/R превысит критическую величину, устанавливаемую неравенством, то на контакте наступит наиболее опасный вид фрикционного взаимодействия – микрорезание.

4 Трение при различных видах смазки

4.1 Виды смазки

Смазочный материал – материал, подводимый к поверхности трения с целью уменьшения трения и износа.

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого уменьшается коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Смазывание – подведение смазочного материала к узлам трения для уменьшения трения и износа.

По физическому состоянию смазочные материалы подразделяются (рисунок 4.1):

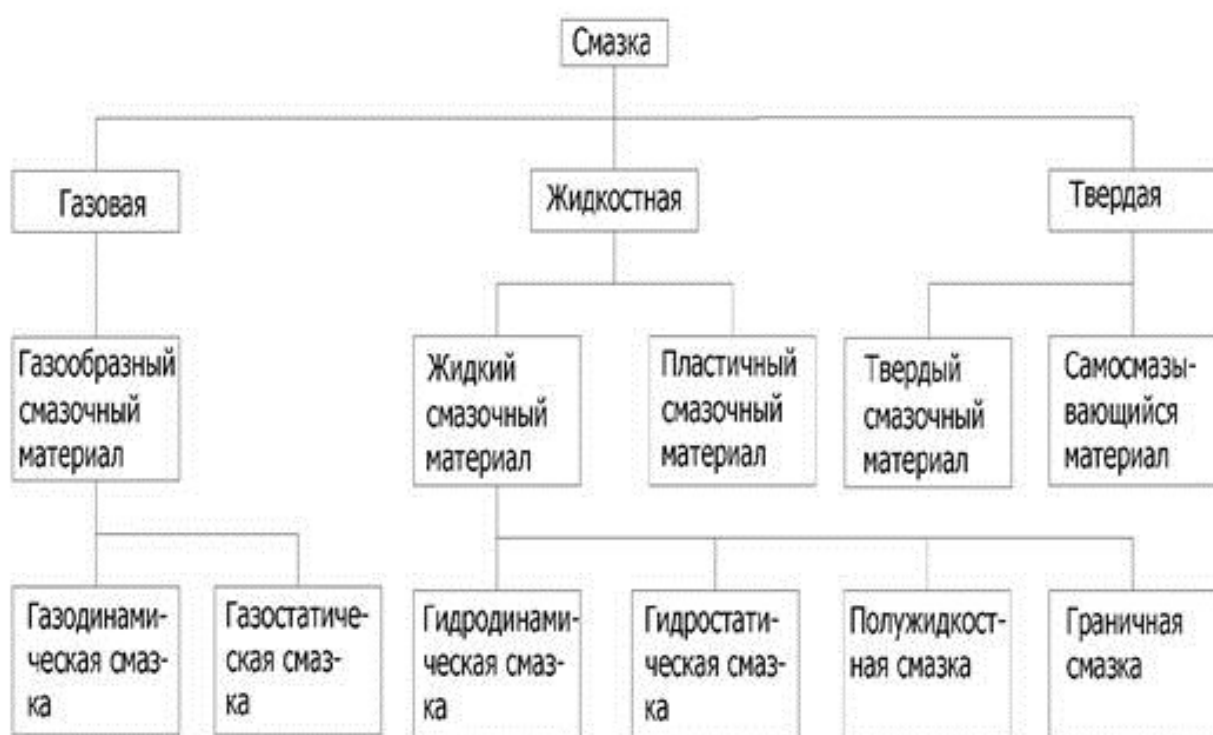


Рисунок 4.1 – Виды смазки и смазочных материалов

4.2 Трение при жидкостной смазке

Гидродинамическая (газодинамическая) смазка – жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения 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.

Диаграмма (рисунок 4.2) показывает зависимость коэффициента трения возникающего в подшипниках скольжения от безразмерного критерия Зоммерфельда λ :

$$\lambda = \frac{\mu' \cdot \omega}{p},$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости;

ω – угловая скорость вращения вала;

p – среднее давление в подшипниковом узле;

f_0 – область трения без смазочного материала;

1-2 – область граничной и полужидкостной смазки;

2-3 – область гидродинамической смазки.

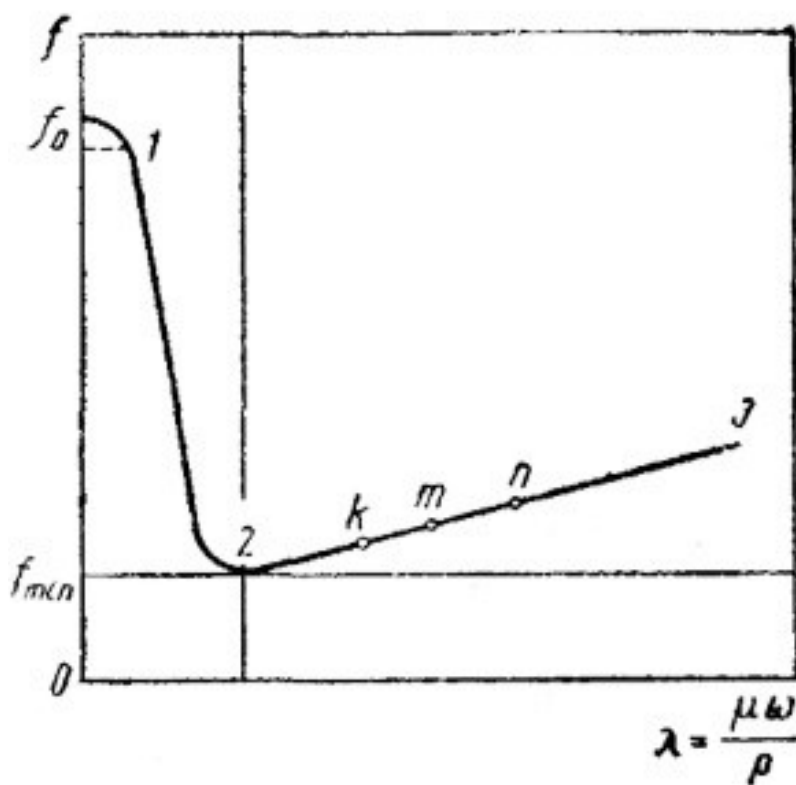


Рисунок 4.2 – Диаграмма Герси-Штрибека

При очень малых скоростях скольжения вала, в подшипниках возникает достаточно высокое значение коэффициента трения ($f \geq 0,3$), так как поверхности трения разделены очень тонким слоем смазочного материала от 1 до 100 Нм (область f_0 -1).

По мере роста угловой скорости, на отдельных участках зоны контакта образуются площадки жидкостного трения, в результате чего f начинает снижаться (область 1-2). При достижении некоторой величины ω , где f соответствует минимальному значению (область 2-3), поверхности твердых тел, становятся полностью разделены жидким смазочным материалом. При этом коэффициент трения равен 0,001-0,005, и наступает режим гидродинамической смазки.

Данный режим является наиболее выгодным т.к. ему, как правило, соответствуют минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

4.3 Температурная стойкость граничных смазочных слоев

Граничными смазочными слоями могут быть слои, образованные на поверхности трения в результате физической адсорбции, хемосорбции и химической реакции.

Одним из наиболее важных факторов, оказывающих влияние на свойства материалов пары трения, является тепло, которое возникает при трении и вызывает нагревание поверхностей и разделяющего их смазочного слоя.

Необходимо знать температурные пределы работоспособности граничных смазочных слоев. Температурная стойкость смазочных материалов при трении определяется путем испытаний их при точечном контакте закаленных стальных образцов с постоянной контактной нагрузкой.

Критериями оценки температурной стойкости смазочных материалов являются:

1) критическая температура, при которой происходит резкое увеличение коэффициента трения, сопровождаемое прерывистым движением и повышением износа образцов, характеризует разрушение смазочного слоя и возникновение сухого трения;

2) температура химической модификации поверхностей трения, при которой в результате разложения химически активной присадки в масле и химической реакции между продуктами ее разложения и металлом поверхности трения образуются слои, образующие пониженной прочностью на сдвиг и выполняющие функцию смазочного материала, и происходит снижение коэффициента трения и прекращение скачкообразного изменения его.

При достижении критической температуры происходит дезориентация молекул в граничном слое, их десорбция и в результате – потеря слоем способности разделять поверхности трения. При достижении температуры химической модификации на поверхности образуется слой типа твердой смазки, который снижает трение и стабилизирует его при больших температурах. Образование такого слоя связано с необратимыми процессами химических реакций, свойствами металлов и активных групп материала присадок. Критические температуры жидких смазочных материалов, лежат в пределах от 120 °С до 210 °С.

Смазочные материалы выполняют не только свою основную функцию (препятствуют трению и износу деталей), но и позволяют увеличить долговечность узла трения. Добиться этого удастся за счет введения дополнительных компонентов в со-

став смазочных материалов. Введение присадок позволяет повысить критическую температуру и снизить температуру химической модификации.

Присадки – это вещества, позволяющие в разы усилить естественные функции базовых масел или придать им новые свойства. Они добавляются к смазочному материалу для придания ему новых свойств или изменения существующих. Применяют в основном три вида присадок: антифрикционные, противоизносные и противозадирные.

1 Антифрикционные присадки снижают коэффициент трения. Применяют животные, растительные жиры и их жирные кислоты, а также соединения серы, фосфора, азота, различные соединения металлов. Все эти соединения являются поверхностно-активными веществами, которые адсорбируются на поверхности металла и удерживаются слабыми ван-дер-ваальсовыми силами.

2 Противоизносные присадки снижают изнашивание трущихся поверхностей. В качестве этих присадок используются производные кислот фосфора, цинковые соли дитиофосфатных кислот, фосфорно-кислые соли бария. Механизм их действия – образование адсорбционных пленок на поверхности металла.

3 Противозадирные присадки препятствуют, ограничивают или задерживают заедание трущихся поверхностей при высоких контактных температурах и нагрузках. Заедание вызывается тем, что в процессе пластической деформации при трении возникают ювенальные поверхности и вакансии в кристаллической решетке металла. Химически активные противозадирные присадки реагируют с ювенальными поверхностями, насыщая свободные вакансии кристаллической решетки, тем самым препятствуя схватыванию. В качестве противозадирных присадок используют органические производные серы и хлора.

Применяют также антикоррозионные, антиокислительные, противопенные, диспергирующие и другие виды присадок. При выборе присадок обычно стремятся получить не односторонний максимальный эффект, а универсальные оптимальные свойства масел с присадками. С этой целью применяют многофункциональные присадки и композиции присадок.

4.4 Трение при граничной, полужидкостной (смешанной) и газовой смазке

Эффект смазочного материала обусловлен двумя явлениями: во-первых, смазка понижает силы адгезионного взаимодействия поверхностей трения (уменьшает молекулярную составляющую коэффициента трения f_m); во-вторых, снижает сопротивление упругому или пластическому оттеснению (уменьшает механическую составляющую коэффициента трения f_d).

Структура граничного смазочного слоя обуславливается физико-механическими свойствами образующих его молекул, природой и состоянием твердой поверхности. Обычно смазочный слой имеет пластинчатое слоистое строение, с попеременной нормальной и касательной ориентацией молекул в соседних молекулярных рядах.

ПАВы находящиеся в смазочном материале адсорбируются на поверхности трения и образуют тонкие смазочные слои толщиной от 1 до 100 Нм. Эти слои прочно соединяются с микрорельефом твердых тел, разделяют их от непосредствен-

ного контакта и резко снижают касательное напряжение связи в областях фактического касания.

Коэффициент трения при граничной смазке определяется соотношением

$$f_{\text{гр}} = \frac{F}{N} = \frac{\tau_{\text{гр}} \cdot A_{\text{г}}}{N} + f_{\text{деф}},$$

где $\tau_{\text{гр}}$ – касательное напряжение среди граничных слоев смазки на участках площади фактического контакта $A_{\text{г}}$.

При возрастании скорости относительного движения V достаточного количества смазочного материала в зоне контакта, часть внешней нагрузки N будет восприниматься жидкими слоями заполняющими впадинами микрорельефа. В этом случае наступает режим смешанного трения

$$F_{\text{см}} = \frac{F}{N} = \alpha \cdot \frac{\tau_{\text{гр}} \cdot A_{\text{а}}}{N} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\tau_{\text{ж}} \cdot A_{\text{Q}}}{N} + f_{\text{деф}},$$

где α – доля номинальной площади $A_{\text{а}}$ на которой реализуется граничная смазка;

$(1 - \alpha)$ – доля номинальной площади $A_{\text{а}}$ на которой реализуется жидкостная смазка;

$\tau_{\text{ж}}, \tau_{\text{гр}}$ – касательное напряжение среди граничных и жидкостных слоев смазки;

При дальнейшем увеличении скорости V поверхности детали трения полностью разделяются смазочным материалом и наступает режим жидкостного трения.

4.5 Газодинамическая, газостатическая смазка

В последние годы все более широкое применение в технике находят узлы трения с магнитной связью, когда разделения поверхностей трения происходит за счет энергии магнитных или электромагнитных полей.

В данном узле создается специальная контролируемая атмосфера в виде атомов смазочного материала в газообразном состоянии, которую могут удерживать на поверхности, в том числе с помощью магнитных полей.

4.6 Трение при твердой смазке

Твердые смазочные материалы обеспечивают смазку между двумя поверхностями в условиях сухого или граничного трения в экстремальных условиях. Твердые смазочные материалы принадлежат к слоистым смазочным анизоделическим соединениям, у которых относительная прочность связей между атомами различна в разных направлениях. Они обладают высокой теплостойкостью (более 400 °C), хорошей адгезией к металлам, малой скоростью газовыделения в вакууме и низкого коэффициента трения. Они могут входить в качестве наполнителя материала, покры-

тия, в состав одного или двух элементов пары трения, либо вносится в виде порошка.

Твердые смазочные материалы применяют в вакуумных оптических электронных системах, вакуумной металлургии, а также в машино- и приборостроении.

Основные типы твердых смазочных материалов: графит, дисульфид молибдена (MoS_2), дисульфид вольфрама (WS_2) (халькогениды тугоплавких металлов) и др.

Графит при трении по твердой поверхности, служит хорошим смазочным материалом для деталей работающих на воздухе. MoS_2 отличен тем, что имеет высокую степень адгезии с поверхностью металлов и большой прочностью на сжатие при очень низкой прочности на сдвиг. (статическое давление $3 \cdot 10^3$ мПа, динамическое - 10^3 мПа, т.е. он практически применим до давления равной пределу текучести многих металлов). Также он прекрасно работает в вакууме (до $t = +1100$ °C) и на воздухе (до $+450$ °C). WS_2 по сравнению с MoS_2 имеет большую стойкость к окислителям. Он химически инертен, нерастворим почти во всех средах, чувствителен лишь к воздействию свободного газообразного фтора, горячей серной кислоты, не токсичен и не вызывает коррозии металлов. В вакууме он имеет теплостойкость 1320 °C. Но применение его сдерживается высокой ценой.

Еще более высокими эксплуатационными свойствами обладают появившиеся в последнее время твердые смазочные материалы на основе селенидов тугоплавких металлов (диселениды молибдена, вольфрама, ниобия). Твердая смазка материала является перспективным смазочным материалом.

4.7 Самосмазывающиеся материалы

Самосмазывающиеся материалы изготавливают методом порошковой металлургии; получив такой материал, его поверхность пропитывают жидким смазочным материалом.

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. Это достигается нанесением на поверхность трения жидких, консистентных или твердых смазочных материалов. В паре трения такой градиент может быть достигнут нанесением пленки, применением самосмазывающегося монолитного материала, который в процессе трения также обеспечивает положительный градиент механической прочности за счет активного наполнителя или выдавливания смазочного материала, либо смолы с твердым смазочным материалом. С ростом температуры в зоне трения все эти явления усиливаются.

В условиях вакуума, применяют металлокерамические материалы или материалы с рабочем слоем твердого смазочного материала.

Металлокерамические самосмазывающиеся материалы либо пропитывают жидким смазочным материалом, либо в их состав вводят твердые смазочные материалы.

Наиболее распространенные отечественные самосмазывающиеся материалы АФ-Зам, АМАН-2, АМАН-4, Эстеран-33.

К технологическим достоинствам самосмазывающихся полимерных материалов относятся:

- практически неограниченные запасы сырья;
- меньшие капиталовложения в производство;
- возможность изготовления деталей высокопроизводительными методами без снятия стружки;
- низкая трудоемкость.

Преимущества самосмазывающихся материалов при эксплуатации:

- упрощение конструкции узлов трения, поскольку отпадает необходимость в сложных системах смазывания;
- снижение трудоемкости обслуживания (отпадает необходимость в периодической профилактической смазке);
- обеспечение надежной смазки в условиях хранения;
- более широкий, чем у жидких смазочных материалов, диапазон рабочих температур.

К недостаткам относятся:

- более высокий, чем при гидродинамической смазке, коэффициент трения;
- ухудшения отвода тепла из зоны трения из-за отсутствия циркуляции жидкого смазочного материала.

5 Влияние различных факторов на коэффициент внешнего трения

5.1 Факторы, влияющие на коэффициент внешнего трения

Основными факторами, влияющими на коэффициент внешнего трения, являются:

- а) нормальная нагрузка;
- б) шероховатость поверхности;
- в) механические свойства контактирующих материалов;
- г) температура твёрдых тел и окружающей среды;
- д) скорость скольжения;
- е) толщина покрытия;
- ж) конструкция узлов трения;

а) С возрастанием нормальной нагрузки при упругом контакте молекулярная составляющая коэффициента трения будет уменьшаться, а деформационная составляющая – увеличиваться. Зависимость коэффициента трения от нагрузки при упругом контакте будет определяться соотношением между его молекулярной и деформационной составляющими. С увеличением нормальной нагрузки значение коэффициента трения при упругом контакте проходит через минимум.

При пластическом контакте коэффициент трения незначительно возрастает с увеличением контурного давления.

б) При контактировании твердых тел неровности более жесткого тела внедряются в поверхность менее жесткого тела. При этом более жесткое тело деформируется значительно меньше, чем менее жесткое. Поэтому деформацией более жесткого тела можно пренебречь и при рассмотрении влияния на коэффициент трения шероховатости поверхности учитывать шероховатость поверхности более жесткого тела.

Различают исходную шероховатость поверхности и установившуюся шероховатость, которая создается на поверхностях контактирующих тел в процессе трения и зависит от условий работы пары. Шероховатость поверхности, соответствующая минимальному коэффициенту трения, называется *оптимальной*.

Для оценки шероховатости поверхности в последнее время предложен комплекс Δ , равный $\frac{R_{max}}{r b^{1/\nu}}$.

При упругом контакте с возрастанием комплекса Δ , молекулярная составляющая коэффициента трения уменьшается, а деформационная составляющая увеличивается. Значение коэффициента трения при упругом контакте с возрастанием комплекса Δ проходит через минимум. При пластическом контакте с увеличением шероховатости коэффициент трения возрастает.

в) Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывают механические свойства менее жесткого элемента трущейся пары. При упругом контакте на величину коэффициента трения влияет модуль упругости E_0 менее жесткого элемента пары трения. С увеличением модуля упругости коэффициент трения уменьшается.

При пластическом контакте основную роль играет твердость. С увеличением твердости, коэффициент трения уменьшается.

г) Молекулярная составляющая коэффициента трения с увеличением температуры в паре трения уменьшается, а деформационная составляющая возрастает. В общем случае с увеличением рабочей температуры величина коэффициента трения проходит через минимум.

Коэффициент внешнего трения

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + k^0 \left(\frac{p_c}{HB} \right)^m,$$

где k^0 и m – коэффициенты, зависящие от шероховатости и степени насыщенности контакта.

Молекулярная составляющая коэффициента трения зависит от средних касательных напряжений, обусловленных межатомными и межмолекулярными взаимодействиями на границе раздела контактирующих твердых тел. Энергоемкость, а, следовательно, и прочность связей, образующихся между взаимодействующими частицами, будет уменьшаться при увеличении температуры. Причем на величину средних касательных напряжений будет влиять поверхностная температура и градиент температур в тонких поверхностных слоях.

Зависимость f от температуры поверхностного трения ν_{max} совместно с зависимостью интенсивности износа I от ν_{max} получила наименование «фрикционная теплостойкость».

Максимальная температура поверхности трения ν_{max} является функцией реализуемой мощности и работы трения при определённой геометрии контакта и воздействии окружающей среды.

$$\nu_{max} = \nu_0 + \nu^* + \nu_{всп} ,$$

где ν_0 – начальная температура пары трения от начала процесса трения;

ν^* – средняя температура номинального (или контурного) контакта;

$\nu_{всп}$ – температурная вспышка на реальном пятне контакта.

д) Крагельский получил обобщённое выражение коэффициента трения от скорости скольжения. Эмпирическая формула зависимости силы трения от скорости скольжения:

$$F = (a + b\nu) e^{-c\nu} + d,$$

где a – зависимость от физ. свойств материалов в паре трения. Он увеличивается с возрастанием модуля упругости и шероховатости поверхности;

b – зависит от вязкопластичных свойств материала;

c – является произведением декремента затухания колебаний на коэффициент вязкости контактных слоёв;

d – характеризует влияние конструкции пары трения и режим трения;

ν – скорость скольжения.

Изменение $\nu_{ск}$ и p_a неизбежно приводят к изменению тепловых процессов при трении. Для материалов, обладающих сравнительно совершенными упругими свойствами и при малоизменяющейся температуре f не зависит от $\nu_{ск}$.

При несовершенных упругих свойствах материала с возрастанием $\nu_{ск}$ функция $f = f(\nu_{ск})$ переходит через максимум и далее может иметь также минимум. Максимум f расположен в зоне скоростей, при которых реализуются наибольшие гистерезисные потери.

При пластическом контакте $\nu_{ск}$ может влиять на величину f через скорость распространения пластической деформации. При увеличении $\nu_{ск}$ пластическая деформация локализуется в тонком поверхностном слое и снижается.

$\nu_{ск}$ по разному влияет на температурную вспышку $\nu_{всп}$, среднюю температуру номинального или контурного контакта ν^* , объемную температуру ν_V . Величина $\nu_{всп}$ зависит от $\nu_{ск}$, а ν^* и ν_V от $\nu_{ск}$ при $p_a = \text{const}$.

Вследствие повышения температур $\nu_{всп}$, ν^* и ν_V при возрастании $\nu_{ск}$ происходит изменение прочности материалов и характера адгезионных связей. С увеличением температур изменяются прочность, толщина и природа защитных пленок на поверхности трения. При малом и значительных p_a не успевает образовываться защитная пленка и процесс упругой и пластической деформации на микро контактах

может перейти в процесс микрорезания, что приведет к возрастанию f . При дальнейшем возрастании $v_{ск}$ при $p_a = \text{const}$ происходит возрастание температур, снижение молекулярной прочности фрикционных связей. В результате происходит выравнивание поверхности трения, уменьшение шероховатости и снижение f .

Средней нагрузке с увеличением скорости скольжения величина коэффициента трения проходит через максимум, причем при увеличении давления (кривая 3) максимум соответствует меньшему значению скорости (рисунок 5.1).

От скорости скольжения зависят мощность тепловыделения и температура узла трения, последняя влияет на механические и фрикционные свойства изнашивающихся поверхностей, ведет к структурным изменениям в поверхностных слоях.

Модуль упругости материалов E с повышением температуры незначительно снижается, разрушающее же напряжение σ_0 уменьшается более существенно. Влияние температуры на f_m и t_y неоднозначно и до настоящего времени еще недостаточно изучено.



1 – при малой нагрузке; 2, 3 – при средней нагрузке; 4 – при значительной нагрузке

Рисунок 5.1 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Экспериментально установлено, что зависимость интенсивности изнашивания от температурно-скоростного (точнее температурно-нагрузочно-скоростного) фактора, определяющего тепловыделение в контакте, имеет так называемые критические точки (рисунок 5.2). При достижении на контакте определённых температур происходят качественные изменения механических и фрикционных свойств поверхностных слоев материалов, при которых интенсивность изнашивания может скачком меняться на несколько порядков.

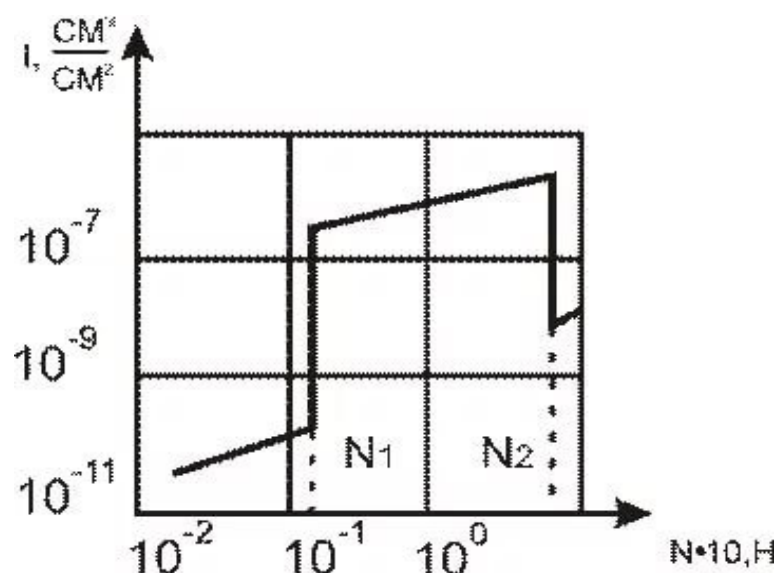


Рисунок 5.2 – Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки для стали (скорость относительного скольжения $v = 2,6$ м/с)

е) Большинство узлов трения представляют собой сложные сплавы на поверхности которых могут быть нанесены покрытия (ХТО, напылением, ТСМ). Данные покрытия по физическим свойствам могут существенно отличаться от свойств основного материала. В большинстве они наносятся с целью уменьшения трения и интенсивности изнашивания, т.к. их структура предполагает низкие фрикционные свойства в следствие особого состава, свойств и др.

ж) Площадь трения, коэффициент взаимного перекрытия ($K_{вз}$), наличие канавок, пазов, форма и размеры контактирующих тел, их жёсткость и эластичность выделяется в число основных параметров, которые наравне с режимом трения и свойствами материалов, влияющими на сохранение или удаление продуктов износа из зоны трения, характеризуют трение.

Площадь фактического контакта A_f определяют коэффициент трения, но она сама при заданном номинальном давлении P_a и сама является функцией фактической номинальной площади трения A_a

5.2 Трение в экстремальных условиях

Температуры от 0° до минус 150° С называют низкими, от минус 150° до минус $272,85^\circ$ С – криогенными, а ниже минус $272,85^\circ$ С – сверхнизкими. В этих условиях многие металлы и сплавы подвергаются хрупкому разрушению. При низких температурах рекомендуется использовать металлы с ГЦК или ГПУ решетками, а также стали с мелкозернистой структурой. Для изготовления пар трения, работающих в условиях низких температур, обычно используют нержавеющую сталь, углеграфит и фторопласт с применением твердых смазочных материалов (MoS_2), а также ЦИАТИМ-205, ЦИАТИМ-221.

Трение в вакууме характеризуется безвоздушной средой, а, следовательно, плёнки оксидов на поверхностях металлов не образуются. В соответствии с этим в контакте участвуют ювенальные поверхности и трение сопровождается высоким коэффициентом трения и катастрофическим износом. В результате может возникнуть схватывание. При трении одноименных пар металлов в вакууме коэффициент трения уменьшается с увеличением твердости. Для улучшения антифрикционных свойств узлов трения применяют самосмазывающиеся материалы (АМАН), твердые смазочные материалы (фторопласт, графит, сульфиды тугоплавких металлов).

5.3 Эффект аномально низкого трения

Российские ученые А. А. Силин, Е.А. Духовский и др. в 1969 г. открыли явление сверхнизкого трения. Коэффициент трения полиэтилена и пропилена при трении в вакууме под воздействием потока атомов гелия (и некоторых других элементов) уменьшился на два порядка (в 100 раз). Интенсивность изнашивания при сверхнизком трении резко снижается.

При облучении тончайший поверхностный слой вещества переходит в упорядоченное состояние. Это состояние характеризуется малой поверхностной энергией и остается устойчивым при нормальной и повышенной температурах. Эффект может проявиться и без облучения, если вещество имеет слоистую кристаллическую структуру. Ориентация структуры такого вещества при трении в вакууме происходит за счет энергии трения. Однако этому процессу мешают примеси, особенно молекулы воды. Бомбардировка ускоренными частицами выгоняет воду, что способствует более быстрой ориентации вещества. Авторами эффекта создан новый самосмазывающийся материал, способный работать в тяжелых и экстремальных условиях. В вакууме при высоких нагрузках он выдерживает как низкие температуры, так и нагрев до 1000°C, а при облучении «короткопробежными» частицами реализует сверхнизкое трение.

6 Динамические процессы при трении. Трение качения

6.1 Динамические модели трения скольжения

Наиболее полно анализ испытаний с учётом основных трибологических факторов выполнен проф. Ф. Р. Геккером. Удалось построить динамическую модель, которая в достаточной мере описывает процесс трения при испытаниях на трибометре ГП.

Абсолютно жёсткий ползун массой m упруго закреплён в горизонтальном направлении при помощи элемента, имеющего жёсткость c и диссипационный коэффициент b . Точечное контактное взаимодействие ползуна с движущимся основанием, имеющим гармонический профиль, моделируется двумя реологическими моделями Кельвина-Фойгта (рисунок 6.1).

Гармонический профиль основания моделирует регулярную шероховатую поверхность трения. Уравнения движения модели имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b\dot{x} + b_x(\dot{x} - \dot{x}_0) + c_x(x - x_0) = 0 \\ m\ddot{y} + b_y(\dot{y} - \dot{y}_0) + c_y(y - y_0) = -P \\ b_x(\dot{x} - \dot{x}_0) + c_x(x - x_0) = R_x \\ b_y(\dot{y} - \dot{y}_0) + c_y(y - y_0) = R_y \end{cases}$$

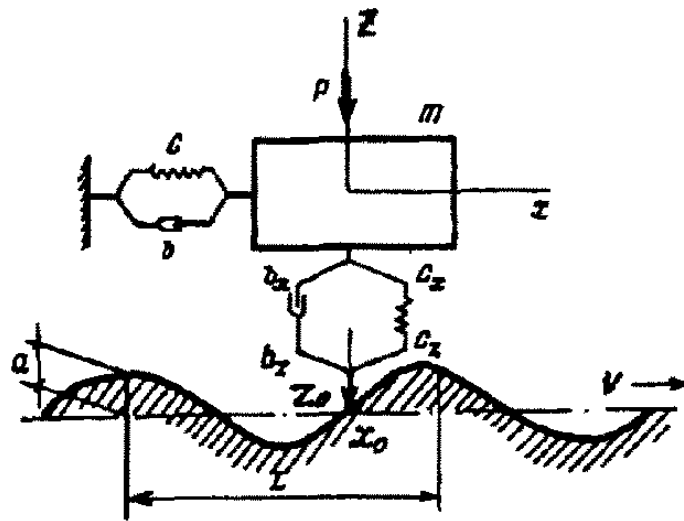


Рисунок 6.1 – Динамическая модель трибометра ГП

Система уравнений не позволяет определить шесть неизвестных x , y , x_0 , y_0 , R_x , R_y . Здесь R_x и R_y горизонтальная и вертикальная реакция в точечном контакте. Два недостающих уравнения получаются из рассмотрения индивидуальных особенностей каждого из трех возможных этапов движения ползуна: относительного покоя контактирующей точки движущегося профиля, их относительного скольжения и движения при отсутствии контакта (полет ползуна).

На этапе относительного покоя выполняются два кинематических условия:

$$x_0 = x_0(t_x) + v(t - t_x), y_0 = y_0(t_x) = \text{const}$$

Здесь t_x – время начала этапа.

Условиями существования относительного покоя являются два силовых неравенства

$$R_x < f_t;$$

$$R_y, R_{.y} > 0.$$

На этапе относительного скольжения выполняются силовые и кинематические условия

$$y_0 = a \sin \frac{2\pi}{L} (x_0 - vt).$$

И

$$R_x = f_m R_y.$$

Условием существования относительного покоя являются:

$$\dot{x} = v, R_y > 0.$$

Третий возможный этап – движение без контакта поверхностей трения (полет ползуна). В этом случае силы в контакте равны нулю:

$$R_x = 0 \text{ и } R_y = 0.$$

Предполагая, что точечный контакт упруго взаимодействует с движущимся профилем основания и в этом взаимодействии реализуется только молекулярная составляющая сил трения, коэффициент трения описывается зависимостью:

$$f_m = \alpha R_y^{1/3} + \beta,$$

где α и β – характеристики данной пары трения.

В процессе расчётов вычисляется «сила трения», замеряемая силоизмерителем

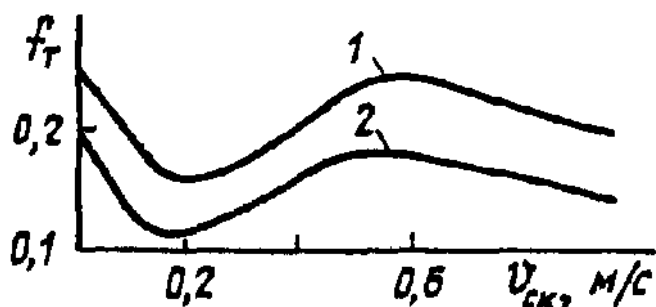
$$F_{\text{тр}} = \frac{1}{T} \int_0^T c x \, dx$$

где T – период колебаний ползуна.

Коэффициент трения f ползуна по основанию зависит от скорости и скольжения, хотя коэффициент трения в точке контакта, подсчитанный по формуле Амонтона в явном виде не зависит от скорости скольжения (рисунок 6.2).

Анализ режимов колебаний, полученных на разных скоростях движения основания, позволяет выявить причину этого явления. При весьма малых скоростях контактирующая точка полностью отслеживает профиль движущегося основания: нормальная реакция $R_y = P$, $f_t = f_m$. Минимум на соответствует режимам, при которых частота кинематического возбуждения со стороны совпадает с собственной частотой колебаний ползуна в нормальном направлении к движению основания (резонансная скорость). На этом режиме контактирующая точка отрывается от профиля основания и достаточно большое время по отношению к периоду T не взаимодействует с ним. При увеличении скорости о превращаются отскоки контактирующей точки, и значительное время она взаимодействует с движущимся профилем основа-

ния. При дальнейшем увеличении активно включаются реологические особенности модели Кельвина-Фойгта, время контактирования уменьшается и происходит всплывание ползуна, приводящее к уменьшению силы (коэффициента) трения. Возможен эффект резонанса колебаний микронеровностей, приводящий к резкому снижению силы трения.



1 – $P = 250 \text{ Н}$; 2 – $P = 500 \text{ Н}$

Рисунок 6.2 – Расчетные зависимости коэффициента трения скольжения единичной неровности f_T от скорости движения основания v при двух нагрузках

Модель, отличающаяся наличием дискретного и множественного контакта. В модели предполагалось, что контактирующие детали состоят из абсолютно твердого основания, имеющего гармонический профиль, и податливой фрикционной накладки, закрепленной на ползуне (рисунок 6.3).

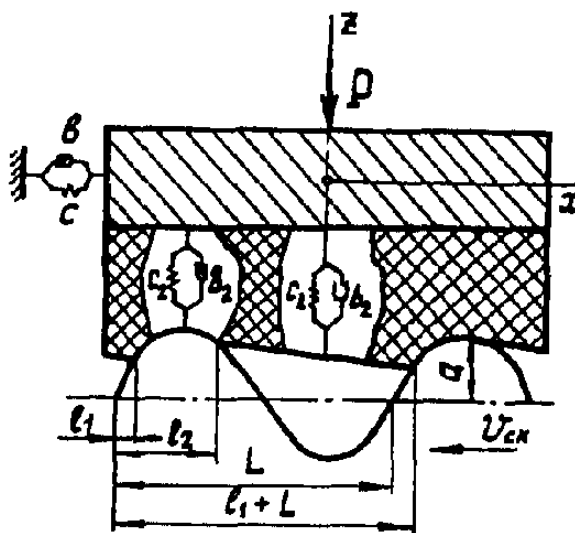


Рисунок 6.3 – Модель лабораторной установки для испытания пар трения

Ползун в горизонтальном направлении фиксируется с помощью упругодиссипационного элемента (силоизмерителя), имеющего жесткость C и диссипационную характеристику, определяемую коэффициентом b . Основание движется с постоянной скоростью v . Ползун прижат к основанию силой P .

Шероховатости основания имеют регулярный гармонический характер с параметрами a и L . Шероховатости накладки представляются равномерно распределёнными по длине набором стержней одинаковой длины, реологические свойства которых в нормальном направлении являются реологической моделью Кельвина-Фойгта (с коэффициентами c_y и b_y). В касательном направлении стержни принимаются абсолютно жёсткими.

При решении предполагается, что на установившемся режиме движения колебания ползуна в вертикальной плоскости отсутствуют. Предполагалось также, что деформации материала в нормальном направлении к поверхности трения упругие, а, следовательно, на единичном пятне контакта справедлива зависимость.

Изложенные выше допущения позволили решать поставленную задачу в замкнутой форме с периодом $T = L/v$, припасовывая решения на границах контакта l_1 , l_2 .

Под всплытием понимается подъём ползуна с увеличением скорости скольжения – явление аналогичное подъёму ползуна при наличии гидродинамических сил при жидкой смазке. При этом с увеличением скорости скольжения коэффициент трения падает.

С увеличением скорости скольжения увеличивается диссипационная составляющая, определяемая коэффициентом b_y , а, следовательно, для уравнивания вертикальной нагрузки P должен разгрузиться упругий элемент с жёсткостью c_y . Это приводит к подъёму ползуна y_0/a и уменьшению фазы констатирования $l_2 - l_1$, т.е. уменьшению числа контактирующих стерженьков и как следствие уменьшению суммарной силы трения и коэффициента трения при той же нагрузке P .

Увеличение жёсткости контакта c_y и амплитуды a приводит к уменьшению коэффициента трения при сохранении общего характера кривых.

Характеристиками трения при скольжении шероховатых поверхностей являются как зависимость коэффициента трения от скорости $f_T = f$, так и зависимость коэффициента трения поверхностей трения от скорости $y_0 = \varphi(v)$. Обе эти зависимости определяются молекулярным взаимодействием контактирующих пар трения, т.е. законом трения, геометрией шероховатых поверхностей и реологическими свойствами поверхностных слоёв тел и промежуточных сред.

Зависимость может быть объективно использована в расчётах только в том случае, если температура трения не оказывает существенного воздействия на физико-механические и химические свойства шероховатых поверхностей и тем самым на молекулярную составляющую силы трения.

В этих условиях необходимо рассматривать многофакторную характеристику трения, которая учитывает зависимость коэффициента трения от нагрузки, скорости скольжения и максимальной температуры поверхности трения, т.е. $f_T = f(P, v, v_{max})$. Для получения этой зависимости из экспериментальных данных исследований трения Ф. Р. Геккером и С. И. Хайралиевым предложен оригинальный метод планирования многофакторного эксперимента.

Если на контактирующие тела воздействуют внешние вибрации, то при определённых условиях они могут оказать существенное влияние на характеристики $f_T = f(v)$ и $y_0 = \varphi(v)$. Отсюда следует, что при получении характеристики $f_T = f(v)$ на ис-

пытательных машинах посторонние внешние вибрации должны быть сведены к минимуму.

6.2 Фрикционные автоколебания

Обеспечение плавного перемещения с весьма малыми скоростями рабочих органов является необходимым условием для точного позиционирования на плоскости или в пространстве. Однако при малых скоростях скольжения часто наблюдается резко выраженная неравномерность движения, которая происходит прерывисто с периодически чередующимися срывами и остановами; такое движение характерно для станков высокой точности, когда надо обеспечить перемещение со скоростью несколько миллиметров в минуту и ниже. Но скачкообразное движение может возникнуть и при более высоких скоростях в узлах трения, если они имеют невысокую жесткость.

Для возникновения фрикционных автоколебаний необходимы условия присущие автоколебательным системам. Этим условиям соответствует наличие в системе источника энергии неколебательного характера, колебательной системы, клапанного механизма, который подает порциями энергию в колебательную систему обратной связи.

Рассмотрим механизм возникновения фрикционных автоколебаний на следующей модели (рисунок 6.4):

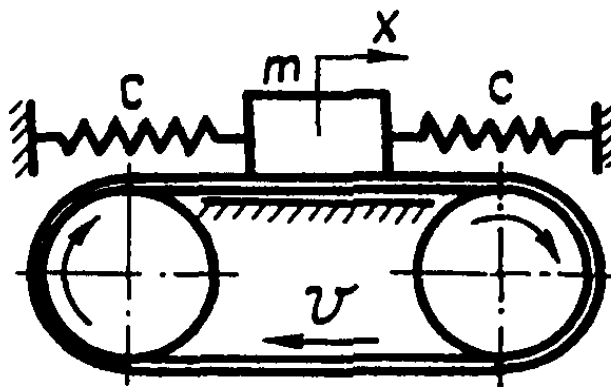


Рисунок 6.4 – Динамическая модель Ван-дер-Поля для демонстрации фрикционных автоколебаний

Бесконечная лента движется с постоянной скоростью v , на ленте находится тело массой m , удерживаемое пружинами общей жесткостью c ; под действием собственной массы тело прижимается к ленте, между телом и лентой при относительном скольжении возникает сила трения $F_{тр}$ и тело увлекается лентой при ее движении.

Этому движению препятствуют пружины, которые при относительном скольжении при определенных силовых условиях срывают тело с ленты и возвращают его в исходное положение.

После срыва тело колеблется с собственной частотой системы, состоящей из массы m и жесткости пружины c ; при движении тела влево, оно по инерции проходит то положение, в котором пружина ненагружена, продолжая свое движение в том же направлении, тело сжимает пружину, а затем достигнув крайнего левого положения под действием сжатой пружины начинает двигаться с ускорением вправо, т.е. в сторону движения ленты. В определенный момент времени скорости тела и ленты сравниваются и с этого момента они начинают двигаться вместе до следующего срыва, и процесс повторяется.

В случае движения системы при фрикционных автоколебаниях включает этапы относительного скольжения и этапы относительного покоя поверхностей трения. Такое движение называется фрикционными автоколебаниями, потому что они порождены трением, а авто – потому что они не навязаны какой-либо извне, внешней колеблющейся силой, а являются внутренним свойством системы, это периодически сменяющиеся фазы прилипания и скольжения.

Фрикционные автоколебания крайне неприятный эффект, для многих машин необходимо обеспечить плавное, без толчков, медленное движение. Поэтому существует два главных пути уменьшения трения при возникновении такого движения:

- улучшить качество обработки поверхностей, чтобы уменьшить пики микронеровностей и тем самым уменьшить силу страгивания;
- обеспечить возможно лучший доступ смазочного материала к поверхности трения и сохранность поверхностного слоя.

Эти два пути не только обеспечивают плавность хода, но и уменьшают ненужные потери энергии в скользящих контактах.

6.3 Вибрационное сглаживание и реверсивное трение

Положим какой-нибудь достаточно тяжёлый предмет (например, тяжёлую книгу) на лист бумаги и попытаемся затем вытянуть этот лист из-под предмета. Если медленно потянуть за лист, книга поползет вместе с ним. Попытаемся тянуть не равномерно, а толчками. Скорость движения вытягиваемого листа будет переменной, и, хотя в среднем она может быть прежней или даже меньшей, обнаруживаем, что книга почти останется на месте, а лист из-под нее вытянется. Книга не отцеплялась от листа из-за наличия сухого трения, большой силы трения покоя. Это сцепление уменьшилось только из-за того, что переменная скорость позволила преодолеть барьер трения покоя и привести тела во взаимное движение.

Пусть на основное движение вытягиваемого конца троса наложены высокочастотные вибрации. Соответственно и сила, приложенная к телу, будет быстро колебаться, вибрировать. Экспериментатор может обнаружить замечательный эффект: неприятное движение толчками исчезнет, прилипание отсутствует, тело будет двигаться плавно, лишь слегка вздрагивая под действием колебаний силы, причем эти колебания могут быть почти незаметны для глаза.

Главный вывод: при не слишком больших средних скоростях средняя сила сопротивления ведет себя не как сухое трение, а как вязкое, жидкое, пропорциональное скорости, а при росте амплитуды эта «средняя» вязкость падает. Такой эффект принято называть вибрационным сглаживанием или ожигением сухого трения под действием высокочастотных вибраций. Он с успехом используется в технике, в особенности в системах управления, использующих механические устройства.

Итак, для обеспечения вибрационного сглаживания требуется приложить быстроменяющуюся силу. На самом деле эффект вибрационного сглаживания может проявляться и совсем нежелательным образом, о чем гласит такая печальная история. К северу от Петербурга находится самое большое в Европе Ладожское озеро. Те, кто бывал на нем, хорошо знакомы с его коварным характером. Оно может быть обманчиво тихим, с «зеркальной гладью вод», но внезапно откуда-то из-за скал подует ветер, и через час разгуляются волны, и притом крутые и частые. Маленькая байдарка прыгает на них как поплавок, а вот о борт большого корабля волны разбиваются с грохотом, заставляя его корпус дребезжать, то есть испытывать высокочастотную вибрацию. Чтобы избежать коварства Ладоги, еще при Петре I построили обводной канал, чтобы доставлять грузы в Петербург по тихой воде. В питерских холодных и мокрых краях хлеб, как известно, растет плохо, и от века пшеницу везли туда из южных районов России. Уже в наши времена соединили Волгу с Ладогой и Невой большими каналами и пустили по ним большие корабли для перевозки зерна. Зерно насыпалось в огромные трюмы и ехало в них к месту назначения. Однако в начале работы таких больших судов произошло несколько катастроф: пересекая Ладогу в осенние дни, некоторые корабли вдруг начинали сильно раскачиваться с борта на борт, а затем опрокидывались. В чем же дело? Ведь теперь любой корабль еще при проектировании детально рассчитывается, чтобы он не мог потерять устойчивость. Выяснилось, однако, что проектировщики при расчетах предполагали, что зерно в трюме будет лежать неподвижно, как положено любому сыпучему материалу, например, куче песка. За счет чего обеспечивается эта неподвижность? Да за счет все того же сухого трения, сцепляющего между собой песчинки или зерна. Это верно, но при отсутствии высокочастотных вибраций! А эти вибрации превратили сыпучий материал почти в жидкий. Зерно в трюме стало колебаться как вода в тазу, наваливаясь на наклонный борт и способствуя переворачиванию. Наверное, каждый, таскавший в руках таз с водой, помнит, как трудно удержать его в горизонтальном положении.

Конечно, как только эффект был понят, нашлись и достаточно простые инженерные решения, чтобы преодолеть неприятные последствия: как и в тех судах, которые возят реальные жидкости, трюм был разделен на отсеки, не позволявшие всему ожигенному грузу наваливаться на один борт.

Во многих механизмах контактирование трущихся поверхностей происходит в режиме реверсивного трения (возвратно-поступательного, возвратно-вращательного). Примерами таких пар трения являются узлы трения трансмиссий и ходовых частей транспортных машин, подвижных единиц железнодорожного транспорта, направляющих станков, кузнечно-прессового оборудования и ряд других узлов подвержены отрицательному воздействию реверсивного трения.

Было установлено, что поверхности трения при реверсивном трении испытывают на себе некоторые изменения, в основе которых лежат упруго-пластические и пластические деформации. При реверсивном движении трущихся поверхностей силы трения и соответствующие им деформации меняют знак. Перемена знака деформирования в первую очередь отражается на упругих, а затем и на пластических деформациях. При реверсивном трении силы трения и соответствующие им деформации вне зоны контакта значительно больше, чем при одностороннем трении.

За счёт волн упругих деформаций происходит ускорение развития усталостных процессов вне зоны контакта, а потом и в зоне контакта. Упругие деформации поверхностных слоёв вне зоны контакта не исчезают, а сохраняются, накапливаются и, благодаря пластическим деформациям в зоне контакта и вблизи, становятся остаточными. Поэтому реверс отражается на остаточных внутренних напряжениях обоих контактирующих тел.

Знакопеременные сдвиговые деформации приводят к более интенсивному, чем при одностороннем трении, расшатыванию микроструктуры, образованию новых поверхностей и разнообразных дефектов как в поверхностных, так и глубинных слоях металла. Возникающие деформации в большей степени располагают рабочие поверхности к задирам, схватыванию и износу, по сравнению с односторонним трением. При реверсивном трении наблюдается увеличение плотности дефектов, что приводит к коагуляции точечных дефектов (вакансий), которые в дальнейшем образуют микропоры, пустоты и трещины.

Сдвиговые процессы пластического деформирования, упрочнения, дефектообразования имеют различное протекание при одностороннем и реверсивном трении, что приводит к различиям в остаточных напряжениях сравниваемых режимов трения. Реверсивность трения влияет на изменение микротвёрдости пластических деформаций. В зоне контакта при реверсивном трении образуется меньший и равномерный наклёп по сравнению с односторонним трением. Такие различия возникают из-за перераспределения пластической деформации под действием касательных сил. При реверсивном трении происходит большее разупрочнение поверхностных слоёв металла, чем при одностороннем трении. Повышенная температура является одним из объясняющих факторов этого явления.

Своеобразное распределение наклёпа при реверсивном трении объясняется тем, что развитие упрочнения под воздействием знакопеременных деформаций проходит в два этапа. На первом этапе, благодаря знакопеременным сдвиговым деформациям, в металле быстрее, чем при одностороннем трении происходит развитие пластических деформаций и возникает предельное упрочнение, характерное для данного режима. На втором этапе знакопеременное деформирование исключает возможность упрочнения металла и приводит к расшатыванию микроструктуры и интенсификации усталостных процессов, как следствие, упрочнение сменяется разупрочнением. При реверсивном трении температура трения выше, чем при одностороннем, поэтому это приводит к отпуску поверхностных слоёв и уменьшению глубины упрочнения.

6.4 Характер взаимодействия контактирующих тел

Трением качения называют трение движения двух твёрдых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

Если цилиндр катится по неподвижной плоскости так, что при повороте его на угол φ ось колеса смещается на величину R_φ (рисунок 6.5), то такой вид движения называют чистым качением, или качением без проскальзывания. При этом точка O_1 колеса, соприкасающаяся с плоскостью, неподвижна, а скорости всех других точек колеса таковы, как если бы оно в данный момент поворачивалось относительно точки O_1 с угловой скоростью ω , равной

$$\omega = \frac{v_0}{R}$$

Здесь v_0 – линейная скорость точки O

При качении колеса по деформируемой под нагрузкой поверхности для поддержания равномерного движения к нему надо приложить момент вращения FR для поддержания равномерного вращения. Этот момент уравнивается реактивным моментом $N'K$, возникающим из-за того, что реакция N' смещена на величину e относительно линии действия силы N .

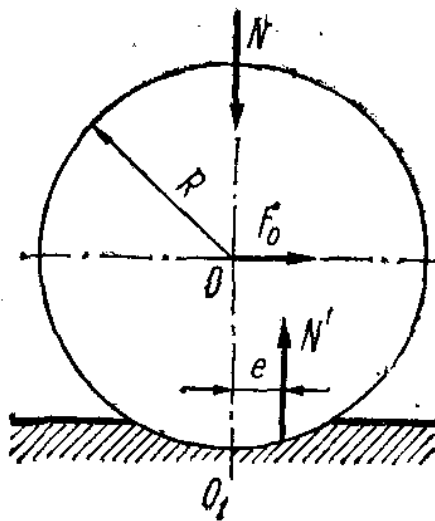


Рисунок 6.5 – Тело, катящееся по плоскости (расчетная схема).

Уравнение моментов в этой точке:

$$\sum M = FR - N'K = 0;$$

$$K = \frac{FR}{N} - \text{коэффициент трения качения.}$$

В такой форме он был введен в 1785 году Ш. Кулоном, который полагал, что «К» зависит только от материалов сопрягаемых тел и численно равен эксцентриситету e и имеет размерность длины. Наряду с этой величиной упоминается величина f_k , которая называется коэффициентом сопротивления качению.

$$f_k = \frac{K}{R}.$$

«К» оказался устойчивым к изменению скорости качения, но зависела от состояния поверхности качения, т.е. в основе сопротивления качению лежит явление несовершенства упругих свойств материалов.

О. Рейнольдс (1876 г.) установил, что одной из причин возникновения сил сопротивления качению является наличие на площадке контакта участков с проскальзыванием, где действуют силы трения скольжения. Деформация растяжения поверхности основания под действием приложенных сил не является равномерной по дуге контакта. В зоне контакта имеются три участка: в центре участок сцепления, где проскальзывание отсутствует, и по краям – два участка с проскальзыванием. Величина проскальзывания зависит от соотношения упругих свойств материалов и радиусов кривизны контактирующих поверхностей.

В настоящее время установлено, что при трении качения упругого катка по деформированному полупространству в зависимости от физических свойств материалов сопротивление качению обусловлено в той или иной мере гистерезисными потерями, микропроскальзыванием и адгезионным взаимодействием между телами на площадке контакта.

7 Особенности трения различных материалов

а) Трение слоистых твердых тел

Известно, что твердые тела имеют пластинчатую или слоистую структуру, и обладают низким коэффициентом трения в следствии ярко выраженной анизотропии свойств. Основными материалами этой группы является: графит, тальк, слюда, дисульфид молибдена, нитрид бора.

Структура графита образована рядом параллельных плоскостей, которые отстоят друг от друга на некотором расстоянии; графит оказывается прочным на сжатие и слабым на срез, поэтому коэффициент трения на воздухе у него мал.

Тальк – природный минерал, слоистый гидросиликат магния. Светлый, полупрозрачный, со стеклянным блеском. Кристаллическая структура пластинчатая. Служит хорошим адсорбентом; устойчив к высоким температурам, воздействиям внешней среды.

Слюдой называют группу слоистых силикатов вулканического происхождения, образовавшихся путем кристаллизации. Некоторые виды появились в ходе метаморфизма горных пород. Отличительными характеристиками являются слоистое строение и высокая спайность. Плоскость спайности можно рассматривать как мат-

рицу из окиси кремния, в которую вкраплены поляризованные атомы калия. Поверхностная энергия плоскости спайности слюды в 20 раз выше чем у графита.

Нитрид бора представляет собой соединение, которое состоит из двух элементов, – азота и бора. Оно активно используется в различных отраслях промышленности благодаря многочисленным неоспоримым достоинствам. Вещество выглядит как порошок белесого цвета. Он обладает такими важными характеристиками:

- инертностью;
- чистотой для экологии;
- отсутствием взаимодействия с большинством реагентов (не возникают химические реакции).

Это вещество не будет смешиваться с металлами, которые расплавлены. Оно напоминает графит. Естественные плоскости спайности содержат два элемента BN. Вещество обеспечивают хорошее смазывание при температуре от 500 °С до 900 °С.

б) Трение политетрафторэтилена (ПТФЭ)

ПТФЭ известен и под другим названием фторопласт. Это твердый пластический материал с необычно низким коэффициентом трения ($f=0,05-0,1$). В отличие от других полимеров его поверхностная прочность на срез существенно ниже объемной прочности на срез. Коэффициент трения практически не изменяется вплоть до температуры размягчения (320 °С). При низких температурах коэффициент трения приобретает значение $f=0,15$.

Низкий коэффициент трения фторопласта можно объяснить преобладанием анизотропно направленных прочностных свойств, вследствие чего некоторые длинноцепные молекулы структуры полимера легко подвергаются сдвигу в одном направлении и не сдвигаются в другом. Этот механизм трения мало отличается от механизма трения слоистых тел, однако ПТФЭ имеет и ряд недостатков:

- недостаточная механическая прочность;
- плохая теплопроводность;
- высокий коэффициент теплового расширения;
- возрастание f при высоких скоростях.

Таким образом, если ПТФЭ применить непосредственно как материал подшипника, то он будет нагреваться, расширяться и заедать. Эти трудности можно преодолеть, вводя фторопласт на поверхность пористого материала, например, спеченной меди. И как следствие, можно получить материал, имеющий объемно-механические и тепловые свойства меди, а поверхностные и функциональные свойства фторопласта.

При высоких скоростях скольжения возникают высокие температуры и нарушается гладкость полированной поверхности фторопласта с образованием следов сильного изнашивания; материал снимается с поверхности частично в виде тонкого порошка, частично в виде волокон. Материал также изнашивается в условиях вакуума.

Для обеспечения долговечности и малого коэффициента трения фторопласта рекомендуется широко использовать наполнители: мягкие металлы, стекловолокно, дисульфид молибдена. Чистый же фторопласт продолжает применяться тогда, когда можно избежать заметного фрикционного нагрева.

в) Трение и износ алмаза

предел текучести алмаза превышает 20 ГПа, а модуль Юнга 4-5 раз больше, чем у стали. Молекулярная структура имеет вид двух взаимнопроникающих ГЦК решеток с естественной плоскостью спайности вдоль октаэдрических плоскостей. Обладает анизотропными свойствами.

При высоких скоростях и больших силах трения алмаз покрывается тонкой перенесенной пленкой металла вследствие крупномасштабного плавления металла. При высоких температурах алмаз превращается в аморфный углерод. Таким образом, полирование алмаза обусловлено в основном высокотемпературным изменением формы углерода (графитизацией). Скорость скольжения является критическим параметром, определяющим трение и износ металлов по алмазу. Алмазы могут истираться при малой скорости полирования пористым чугуном.

г) Адгезия льда

Данное явление наблюдается, когда вода замерзает на чистых поверхностях металла, поверхность раздела прочнее льда и разрушение происходит внутри него.

Наличие загрязнения поверхности металлов снижают адгезию. С практической точки зрения целесообразно заменять один металл другим, поскольку для всех комбинаций лед-металл, поверхность раздела прочнее чем лед. Низкое трение поверхности, покрытой льдом, обусловлено образованием тонкой поверхностной пленки воды в областях контакта

д) Трение хрупких тел и древесины

К хрупким телам относятся: каменная соль, сера, сапфир, сульфид свинца и др. эти материалы не обладают пластичностью, они трескаются и раскалываются при малых деформациях. Эксперименты с трением при скольжении полусферического стального ползуна по каменной соли показали, что микроскопическое дробление поверхности соли вызывает наклон блоков материала относительно первоначального уровня. Таким образом, в области скольжения преобладает пластическое течение.

е) Трение древесины

Физическая структура древесины является сложной. Она обладает примечательным сродством с водой, которая влияет на ее механические свойства и характеристики трения. Можно выделить два этапа поглощения воды:

- сначала вода поглощается поверхностью волокон древесины и проникает внутрь стенок волокон. Этот процесс называется молекулярной сорбцией и обеспечивает поглощение 30-40 % воды;

- затем оставшаяся часть воды проникает в объем древесины и удерживается в капиллярных пространствах.

Древесину можно классифицировать как вязкоупругий материал, поэтому его характеристики трения можно представить в виде адгезионного трения и гистерезиса, сильно зависящий от содержания в древесине влаги.

Так как большая часть коэффициента трения скольжения обусловлена адгезией, то можно утверждать, что адгезия снижается с увеличением содержания влаги. Поскольку трение качения почти полностью определяется гистерезисом, то гистерезисные потери повышаются с увеличением влаги.

8 Внутреннее трение

8.1 Внутреннее трение в твёрдых телах

Внутреннее трение в твёрдых телах, свойство твердых тел необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщённую телу в процессе его деформирования. В. т. связано с двумя различными группами явлений – неупругости и пластической деформацией.

Неупругость представляет собой отклонение от свойств упругости при деформировании тела в условиях, когда остаточные деформации практически отсутствуют. При деформировании с конечной скоростью в теле возникает отклонение от теплового равновесия. Например, при изгибе равномерно нагретой тонкой пластинки, материал которой расширяется при нагревании, растянутые волокна охладятся, сжатые – нагреются, вследствие чего возникает поперечный перепад температуры, т.е. упругое деформирование вызовет нарушение теплового равновесия. Последующее выравнивание температуры путём теплопроводности представляет собой процесс, сопровождаемый необратимым переходом части упругой энергии в теплоту (релаксационный процесс).

При упругом деформировании сплава с равномерным распределением атомов различных компонентов может произойти перераспределение атомов в веществе, связанное с различием их размеров.

Деформация, возникающая в упругом теле, зависит не только от приложенных к нему внешних механических сил, но и от температуры тела, его хим. состава, внешних магнитных и электрических полей, величины зерна, его кристаллической структуры.

Величину внутреннего трения измеряют по затуханию свободных колебаний, по резонансной кривой для вынужденных колебаний, по относительному рассеянию упругой энергии за один период колебаний.

Механизм внутреннего трения при пластической деформации существенно отличается от такого же механизма при неупругости. Различие в механизмах рассеяния энергии определяет разницу в значениях вязкости, отличающихся на 5-7 порядков.

Термоупругое внутреннее трение связано с неоднородностью напряжений. При быстром приложении нормальных напряжений температура материалов изменяется. Если изменения напряжений происходят во всех объеме материала, то соответствующие им изменения температуры будут сопровождаться необратимыми тепловыми потерями. В конечном итоге этот механизм приводит к переходу механической энергии в тепловую.

Другой тип внутреннего трения связан с пластическим течением. При возрастании частоты колебаний потери на внутреннее трение обусловлены тепловой релаксацией на молекулярном уровне, а при сверхвысоких частотах – распространением волн.

Внутреннее трение в твердых телах обладает следующими преимуществами.

а) Ограничением величин напряжений, возникающих при колебаниях вблизи резонанса.

б) Увеличением предела выносливости материалов с высокими демпфирующими свойствами (или большим внутренним трением).

в) Снижением уровня шумов. Применение пластических материалов, демпфирующие характеристики которых примерно в 10 раз выше, чем у стали, для изготовления деталей машин значительно снижает уровень шума при тех же ударных и вибрационных воздействиях.

Основной недостаток внутреннего трения – это выделение тепла.

8.2 Внутреннее трение в жидкостях и газах (вязкость)

Вязкость (внутреннее трение) – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Вязкость твердых тел обладает рядом специфических особенностей и рассматривается обычно отдельно. Основной закон вязкого течения был установлен И. Ньютоном:

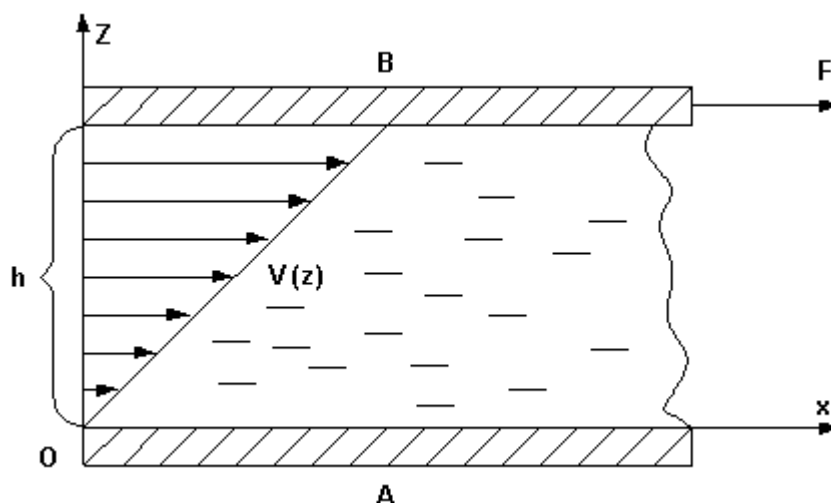
$$F = \eta \frac{v_2 - v_1}{z_2 - z_1} S,$$

где F – тангенциальная (касательная) сила, вызывающая сдвиг слоёв жидкости (газа) друг относительно друга;

S – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;

$(v_2 - v_1)/(z_2 - z_1)$ – градиент скорости течения (быстрота изменения ее от слоя к слою).

Коэффициент пропорциональности η называется коэффициентом динамической вязкости. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению её слоёв (рисунк 8.1). Величина $\varphi = 1/\eta$ называется текучестью.



$v(z)$ – зависимость скорости слоя от расстояния z до неподвижной пластинки;

Рисунок 8.1 – Схема однородного сдвига (вязкого течения) слоя жидкости высотой h , заключенного между двумя твердыми пластинками, из которых нижняя (А) неподвижна, а верхняя (В) движется под действием тангенциальной силы с постоянной скоростью v_0 .

Вязкость численно равна тангенциальной силе, приходящейся единице площади, необходимой для поддержания разности скоростей, равной единице, между двумя параллельными слоями жидкости (газа), расстояние между которыми равно единице. Вязкость измеряется в Па·с (в СИ; в СГС – в пуаз).

Кинематическая вязкость μ физическое свойство жидкости, заключающееся в способности оказывать сопротивление относительному движению или деформации. По существу, вязкость есть внутреннее трение в жидкости, возникающее при относительном движении молекул. Чем больше скорость относительного движения, тем выше сопротивление сдвигу со стороны смазки. Вязкость смазочного масла является лучшим отдельным показателем, по которому определяют область применения масла. Она определяет потери на трение, тепловыделение, КПД, несущую способность, толщину пленки, расход смазки и во многих случаях износ.

Вязкость жидкости в некоторых случаях определяется прибором, предложенным И. Ньютоном. Вращением одного цилиндра относительно другого, концентричного с ним цилиндра при заполненном жидкостью зазоре между ними, необходимо приложить тангенциальную силу F , чтобы вызвать сдвиг жидкости с постоянной скоростью.

$$F/A = \text{const} \cdot (V/h),$$

где A – площадь боковой поверхности одного из цилиндров;

V – окружная скорость вращения;

h – толщина кольцевого слоя жидкости.

Постоянную в соотношении Ньютон назвал коэффициентом вязкости (или динамической вязкостью) $\mu = \eta/\rho$ (где ρ – плотность вещества), которая измеряется

м²/с (в СИ; в СГС – в стоксах). Вязкость жидкостей и газов определяют вискозиметрами.

Существует множество способов измерения как динамической, так и кинематической вязкости жидкостей.

а) Ротационный вискозиметр обеспечивают прямое измерение динамической вязкости μ .

б) Вискозиметр с падающим шариком наиболее прямой метод измерения динамической вязкости смазка заключается в измерении установившейся скорости падения шарика внутри испытываемой жидкости.

в) Измерение вязкости посредством капиллярного вискозиметра проводят по истечению испытываемой жидкости через капиллярное отверстие, по-видимому, является в настоящее время самым распространенным способом.

Вязкоупругость – свойство вещества в твердом состоянии, быть как упругими, так и вязкими.

Движение молекул внутри твердых тел, жидкостей или газов приводит к рассеиванию внутренней энергии вследствие столкновений, растяжения, кручения, колебаний скольжения молекул. Это явление часто называют внутренним трением, и оно принимает различные формы главным образом в зависимости от фазового состояния тел. В твердых телах внутреннее трение может проявляться в виде петли гистерезиса, и существует несколько параметров, характеризующих его величину в конкретном применении. В жидкостях и газах внутреннее трение проявляется как вязкость.

8.3 Методы определения внутреннего трения

Существует пять общепринятых методов определения величины внутреннего трения:

- определение затухания амплитуды свободных колебаний;
- определение петли гистерезиса кривой напряжение деформация при вынужденных колебаниях;
- определение резонансной кривой при вынужденных колебаниях;
- измерение энергии, рассеиваемой при вынужденных колебаниях;
- определение постоянных, характеризующих распространению звуковых волн.

Все эти методы, за исключением первого, связаны с вынужденными колебаниями, т.е. колебания, возбуждаемыми извне, при которых восполнение потерь энергии на внутреннее трение обеспечивает поддержание установившегося режима в системе.

Скорость затухания распространяющейся в твердом теле волны служит мерой внутреннего трения в материале. Существуют несколько методов определения внутреннего трения.

а) Прямое наблюдение амплитуды волны, распространяющейся в среде

При помощи кварцевого кристалла, закрепленного на одном из концов образца в виде цилиндрического стержня, посылается короткий импульс. Скорость рас-

пространения определяется по интервалу времени между отраженными импульсами, а затухание – по уменьшению амплитуды последовательных импульсов.

Этот метод в равной мере применим к волнам сдвига, растяжения – сжатия, а также к продольным и поперечным волнам.

б) Определение комплексного коэффициента отражения твердого тела

В этом методе, по существу, измеряют интенсивность ультразвуковой волны, проходящей через жидкость вначале беспрепятственно, а затем при установленном на ее пути тонком листовом образце испытуемого материала. Потери интенсивности проходящей волны зависят от угла, под которым установлен образец. По этим данным находят постоянную затухания материала.

в) Прибор Фитцжеральда для определения внутреннего трения

В большинстве методов экспериментального определения внутреннего трения в твердых телах возбуждают вынужденные колебания закрепленного образца и измеряют либо напряжения и деформации, либо изменение энергии. Одним из наиболее совершенных и часто применяемых устройств для определения внутреннего трения эластомеров является прибор Фитцжеральда. Две катушки, размещенные в раздельных радиальных магнитных полях, механически соединены между собой и с испытуемым образцом посредством жесткой и легкой металлической трубки. Эта трубка подвешена на проволоках так, что может двигаться только в осевом направлении, эти движения определяют напряжения сдвига в образце.

Прибор Фитцджеральда универсален в части выбора частот. Наряду с измерением демпфирующей способности, или внутреннего трения, он позволяет определить, согласно соотношению, электрические параметры по известным механическим свойствам. Другое важное применение этого прибора связано с изучением поведения неупругих материалов в процессе выдавливания и пластического течения.

8.4 Основные теории внутреннего трения

Предложено несколько теорий этого явления:

- дислокационная теория;
- термоупругая теория;
- теория релаксации и ползучести
- теория вязкоупругости.

а) Дислокационная теория внутреннего трения металлов

Эта теория объясняет пластическое течение как сумму отдельных смещений, возникающих на дефектах. Дефект определяется как участок внутри объема материала, где средняя плотность может быть такой же, как и в окружении, но в одной части его плотность выше из-за «упаковки» молекул, чем в другой. Вследствие этих изменений плотности каждый дефект является источником внутренних напряжений, и возникает тенденция к слиянию двух отдельных дефектов противоположной ориентации, называемых дислокационной парой. Приложенные извне напряжения сдвига могут растягивать их в конкретных кристаллографических определенных

направлениях, вызывая небольшое накопление молекул на двух противоположных гранях кристалла.

Согласно теории упругости, внешнее напряжение сдвига будет преодолевать естественную тенденцию к слиянию дефектов только в том случае, когда это напряжение τ превышает определенную минимальную величину:

$$\tau = CG \sqrt{\frac{\lambda d}{l}}$$

Соотношение точно описывает зависимость между напряжением и перемещением; поэтому дислокационная теория может рассматриваться как причина механического упрочнения.

б) Термоупругая теория

Эта теория, фокусирует внимание на необратимом тепловом потоке, сопровождающем изменения напряжений внутри тела. Под действием напряжения между материалом и окружающей средой возникает тепловой поток или изменение температуры либо то и другое одновременно. Если тонкую проволоку постоянного поперечного сечения подвергнуть в адиабатических условиях растяжению силой ΔF , то произойдет изменение температуры на величину ΔT на величину

$$\Delta T = T\alpha L \Delta F / C_p,$$

где T – абсолютная температура, К;

α – температурный коэффициент линейного расширения;

1/К; L – длина проволоки, см;

C_p – теплоемкость системы, эрг/К.

Логарифмический декремент затухания может быть получен в виде интеграла

$$\beta = \frac{\pi(\omega/\omega_0)^2}{2TU [1+(\omega/\omega_0)^2]} \int \Delta Q \Delta T dv,$$

где U – полная энергия колебаний объема v ;

T – приращение температуры элемента dv в адиабатическом процессе.

Непосредственно связан с тепловыми параметрами ΔQ и ΔT , которые появляются при изменении напряжений внутри тела вследствие неоднородности его материала или наличия конечного распределения напряжений внутри образца.

Остальные теории релаксации, ползучести и вязкоупругости применимы к эластомерным материалам, таким, как резина и пластики. Согласно релаксационной теории, напряжение, необходимое для поддержания постоянной деформации вязкоупругого образца, со временем будет уменьшаться (кривая АВ) (рисунок 8.2).

Если теперь освободить образец от нагрузки, вызывающей начальное напряжение, то произойдет упругое восстановление в состояние C , которое может оказаться ниже нуля. Остаточное напряжение вызывает дальнейшую релаксацию до точки D .

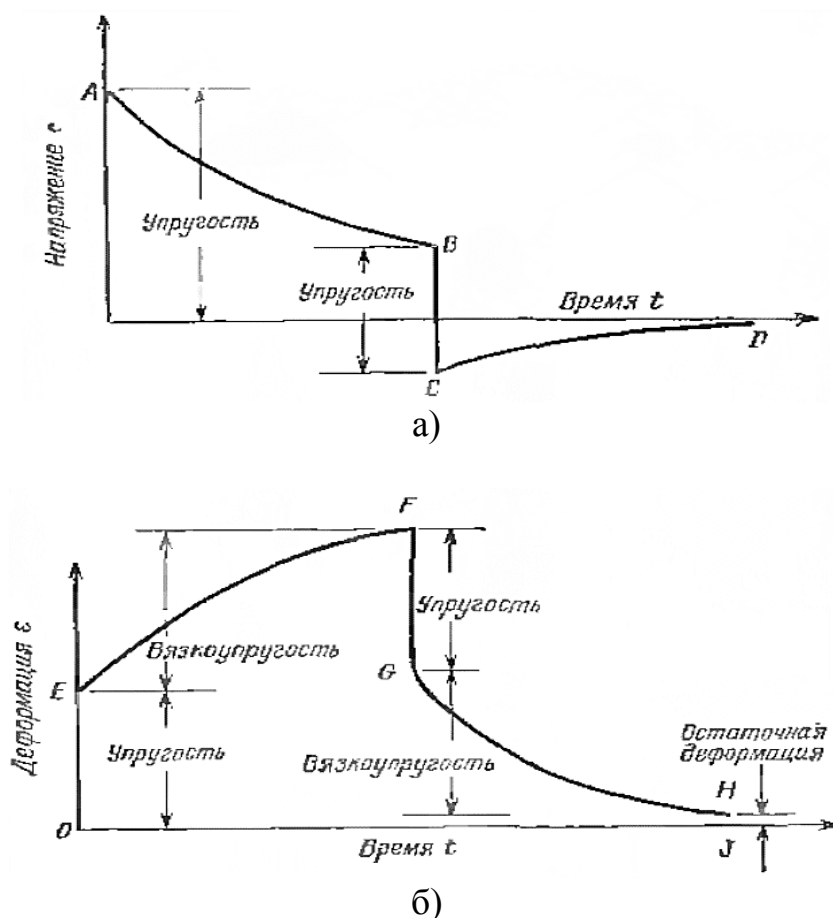


Рисунок 8.2 – Релаксация (а) и ползучесть (б) как результат внутреннего трения

Теория ползучести утверждает, что если материал мгновенно нагружен некоторым напряжением, которое в дальнейшем поддерживается постоянным, то деформация образца возрастает со временем, т. е. образец «ползет». Мгновенное снятие нагрузки приведет к немедленному упругому восстановлению из состояния F в состояние G с последующим постепенным вязкоупругим восстановлением в состояние H . При этом обычно сохраняется деформация HJ , называемая остаточной. Явления релаксации и ползучести обусловлены медленными внутренними движениями молекул в процессе приспособления образца из эластомера к новому напряженному или деформированному состоянию.

Динамические механические характеристики материала описывают его деформацию под действием переменных во времени напряжений. Знание динамических свойств материалов в широком диапазоне частот и температур позволяет сделать правильный их выбор для различных применений, в том числе для подавления шумов и вибраций. Тангенс угла потерь служит, мерой внутреннего трения в мате-

риалах, и его величина может принимать значения в очень широком диапазоне – от 0,0001 для металлов, до 10 для резин и пластических материалов.

Для всех материалов справедливо следующее соотношение между мерой внутреннего трения (логарифмическим декрементом затухания β) и модулем Юнга E :

$$\beta E = const.$$

Материалы с высоким модулем упругости, обладают очень малым внутренним трением и хорошо проводят звук. С другой стороны, эластомеры, обладают весьма высоким демпфированием, но очень малые значения модуля Юнга и низкая жесткость делают их практически бесполезными в качестве материала несущих конструкций.

8.5 Внутреннее трение в газах

Вязкость в газах обусловлена обменом импульсами между слоями, имеющими различные скорости. Отдельные молекулы движутся быстрее, чем остальные, поэтому вовлечение их в обмен импульсами снижает скорость быстро движущихся молекул и повышает скорость медленно движущихся молекул, и этот необратимый процесс выравнивания скоростей приводит к внутреннему трению и, следовательно, к вязкости.

Вязкость газа увеличивается с повышением абсолютной температуры, в то время как вязкость жидкостей существенно уменьшается с повышением температуры:

$$\mu \sim \sqrt{T}.$$

Величина вязкости μ газов составляет $\sim 1\%$ вязкости жидкостей, и рассеивание энергии за счет внутреннего трения относительно мало в большинстве практических применений, где газ используется в качестве смазочного материала.

9 Основные понятия и определения, относящиеся к физике и механике изнашивания

9.1 Общие понятия, виды и характеристики изнашивания

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточных деформаций при трении проявляющих в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (длины, объема, массы)

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

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия до разрушения или другого предельного состояния.

Безотказность – свойство объекта, непрерывно сохранять работоспособное состояние в течении некоторого периода времени.

Долговечность – свойство объекта длительно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния.

Повышенный износ деталей в сочленениях в одних случаях нарушает герметичность рабочего пространства машины, в других – нарушает нормальный режим смазки, в-третьих – приводит к потере кинематической точности механизма.

Износ инструмента и рабочих органов машин, помимо снижения производительности, повышает расход энергии.

Износ и повреждение поверхностей снижают сопротивление усталости деталей и могут служить причиной их разрушения даже при незначительных концентрациях напряжений и весьма низких номинальных напряжениях.

Процессы изнашивания, сведены к ряду классов, внутри которых закономерности их изнашивания приемлемо устойчивы.

Адгезионное изнашивание проявляется при высокой нагруженности сопряжений. (Нагруженность сопряжения определяется не столько нормальными, сколько касательными силами, и поэтому зависит от условий смазывания.)

Адгезионное изнашивание опасно тем, что флуктуации микронапряжений могут достичь макроскопических размеров и соответственного увеличения зоны разрушения. Проявляется это в резком возрастании потерь на трение, фрикционного разогрева и износа. Увеличение толщины пограничного слоя вследствие разрыхления может превысить зазор в сопряжении и привести сопряжение к заклиниванию и поломке.

Окислительное изнашивание возникает при умеренных условиях эксплуатации отсутствии агрессивных сред или катализирующих условий. Диапазон скоростей изнашивания при окислительном изнашивании велик, однако для него характерен и довольно широкий диапазон внешних нагрузок на сопряжение, при котором оно сохраняет приемлемые для практики значения. Повышение температуры способствует увеличению скорости изнашивания.

Коррозионно-механическое изнашивание является наиболее распространенным при эксплуатации машин характеризуется образованием вторичных структур вследствие химических или электрохимических реакций.

Целенаправленное управление этими реакциями (например, введением в масла присадок) является основным путем повышения износостойкости сопряжений.

Под абразивным изнашиванием понимают изнашивание, при котором давление абразивной частицы на материал осуществляется за счет внешних сил, на нее действующих. Это имеет место, при попадании абразивных частиц контакт двух трущихся тел, когда разделяющие поверхности частицы воспринимают внешнюю нагрузку на сопряжение, либо при трении о грунт, когда сила прижатия частицы

определяется давлением, оказываемым массой частиц деформируемой части грунта и т.д.

Под абразивном изнашивании, скорости фрикционного разрушения и потери массы близки по значениям. Скорость изнашивания велика, вторичные структуры не образуются, а влияние внешней среды проявляется в той степени, какой она влияет на разрыхления материала. Наиболее общим свойством процессов абразивного изнашивания является установленная М. М. Хрущовым и М. И. Бабичевым линейная связь интенсивности изнашивания твердостью

$$I = C \cdot HV$$

Коэффициент C в общем случае не является константой и подчиняется закономерностям «старения».

Под эрозионным изнашиванием понимают изнашивание в результате динамического действия изнашиваемого тела жидкостным или газовым потоком.

Скорость изнашивания определяется кинетической энергией частиц, углом их соударения с поверхностью и концентрацией в потоке. Определенные затруднения при оценке углов атаки и скорости соударения, вызванные тем, что при омывании тела потоком вблизи его поверхности возникает пограничный слой, который может быть турбулентным.

При эрозионном изнашивании среда оказывает сильное влияние на износостойкость; пластическая деформация поверхностного слоя может быть значительной, а также возможно образование вторичных структур.

Кавитационное изнашивание возникает тогда, когда в пограничном слое потока жидкости омываемого тела наряду с зонами повышенного давления возникают зоны разрежения. Если давление падает ниже давления насыщенных паров жидкости, последней образуются газовые полости и нарушается сплошность потока. Попадая в зоны высоких давлений, эти полости схлопываются, вызывая эффекты гидравлических ударов. Возникающие флуктуации давлений вблизи поверхности интенсифицируют процессы ее разрушения и химические реакции.

9.2 Классы и разряды износостойкости

Для объективного контроля и прогнозирования составления узлов трения на всех стадиях их жизненного цикла необходимо введение нормативных унифицированных показателей триботехнического качества. Комплексным и наиболее универсальным показателем является интенсивность линейного изнашивания или износостойкость.

Значения износостойкости на практике колеблются в широких пределах $I=10^3 \div 10^{13}$.

Устанавливаются десять классов износостойкости – от 3 до 12 класса включительно. Нижняя граница I в каждом классе не входит в его состав.

Каждый класс износостойкости разбивается на пять разрядов.

Для обозначения класса износостойкости устанавливаются буквенно-цифровой символ, в котором первые два места занимают прописные буквы КИ, да-

лее следует обозначение номера класса арабскими цифрами от 3 до 12 и после косой черты – арабские цифры от 1 до 5, соответствующие номеру разряда в данном классе.

9.3 Механизмы и стадии изнашивания

Пара трения – совокупность двух подвижно сопрягающихся поверхностей деталей (образцов) в реальных условиях службы или испытаний. Помимо материала, формы контактирующих поверхностей, относительного их перемещения, пара трения характеризуется окружающей средой, в том числе видом смазочного материала. Под узлом трения понимают узел машины, содержащий пары трения.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие выхода детали (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой ввиду снижения надежности механизма.

9.4 Механизм изнашивания металлических поверхностей

В процессе изнашивания неровности одной поверхности зацепляются за неровности сопряженной поверхности; это приводит при скольжении поверхностей к срезанию и выламыванию неровностей. В результате взрывов образуются новые неровности. Так процесс продолжается с выглаживанием поверхностей трения.

Для анализа расчленим процесс изнашивания на три явления:

- взаимодействие поверхностей трения;
- изменения, происходящие в поверхностном слое металла;
- разрушение поверхностей.

Эти явления не следует рассматривать как последовательные этапы они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга. Разумеется, взаимодействие поверхностей при их относительном перемещении изменяется. Точно так же разрушение поверхностей является завершающим этапом их изнашивания. Тем не менее, поскольку разрушение не охватывает одновременно всю поверхность трения (оно происходит, как правило, в отдельных ее участках), другие участки претерпевают только физико-химические изменения. Частичное разрушение и изменения свойств поверхности влияют на взаимодействие поверхностей.

а) Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых 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 вырывам материала. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки.

Отметим, что хрупкость и пластичность твердого тела не являются свойствами, присущими ему независимо от напряженного состояния.

В случае неравномерного всестороннего сжатия в зависимости от главных напряжений тела могут находиться в пластичном, хрупком или переходном состоянии

Если выделить элемент (рисунок 9.1) с площадкой фактического контакта в виде одной из граней этого элемента, то все его грани будут находиться под сжимающими напряжениями, поскольку под действием приложенной нормальной нагрузки по оси x элемент должен увеличиться в направлении осей y и z , но этому препятствует окружающий материал. На площадке контакта действует сила трения, и элемент поэтому находится под действием не только нормальных, но и касательных напряжений. Такое напряженное состояние способствует пластическому течению материала.

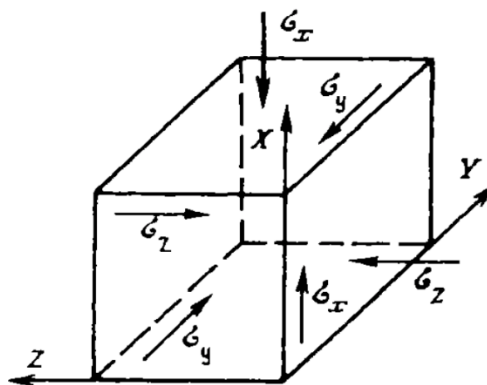


Рисунок 9.1 – Схема напряженного состояния элемента поверхности твердого тела на площадке непосредственного контакта при трении

Активным называют слой, который примыкает к контактирующей поверхности элемента пары трения и в котором могут происходить всякого рода физико-химические изменения, связанные с процессом трения.

б) Изменения на поверхностях трения обязаны деформации, повышению температуры и химическому действию окружающей среды.

- изменения, вызванные деформацией, заключаются в следующем:

1 Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.

2 Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Пластическое деформирование твердых тел складывается из четырех наиболее важных элементарных процессов: скольжения по кристаллографическим плоскостям; двойникования кристаллов; отклонения атомов от правильного расположения в решетке и их тепловое движение; разрушения структуры.

3 Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу поверхностного слоя – его упрочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена, микротвердость понижена. Микротвердость достигает максимума на некоторой глубине, далее уменьшаясь до исходной.

4 При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения.

- влияние повышения температуры:

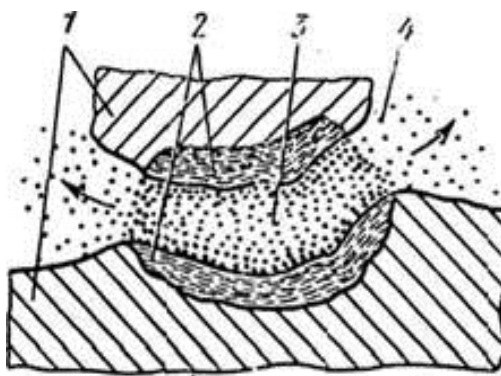
1 Если по условиям службы или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не накладывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности (размягчения) – происходит выглаживание поверхности за счет растекания всего металла или только одной составляющей сплава.

2 Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами.

3 При интенсивном локальном повышении температуры (температурной вспышке) и последующем резком охлаждении поверхности окружающей холодной массой металла на поверхности могут образоваться закалочные структуры.

4 Пластическая деформация, возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения, каждое в отдельности и совместно вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его разрыхление.

5 При микроскопическом исследовании контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена возможность образования магмы-плазмы (рисунок 9.2).



1 – исходная структура; 2 – расплавленная структура; 3 – плазма; 4 – электроны, движущиеся при трибоэмиссии

Рисунок 9.2 – Модель магмы-плазмы

1 В среде воздуха на обнаженных при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются окисные пленки в результате действия кислорода газовой фазы или содержащегося в масле и его перекисях. Окисные пленки предохраняют поверхности от схватывания и связанного с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала и граничной смазке, но и при полужидкостной смазке.

2 Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли окисных пленок. Пленки эффективно защищают поверхность от изнашивания, если скорость их образования превышает скорость изнашивания.

3 Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разложения смазочного материала при высокой температуре.

- химическое действие среды заключается в следующем:

4 Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание. Очень интенсивно разрушает поверхности водород.

в) Разрушение поверхностей трения, обнаруживаемое визуально или под микроскопом, происходит в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от материалов и условий трения:

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

- царапание. Вдавлившийся участок поверхности или частица при скольжении отесняет перед собой и в стороны и подминает под себя материал, оставляя царапину.

- отслаивание. Материал при пластическом течении может отесняться в сторону от поверхности трения и после исчерпания способности к дальнейшему течению отслаиваться.

- выкрашивание – это распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях качения. Для выкрашивания характерна произвольная форма язвенок с рваными краями. Выкрашиванию способствуют высокие растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое после обработки, трещины после цементации, закалки или старения.

- глубинное вырывание возникает при относительном движении сцепившихся тел, когда образовавшийся вследствие молекулярного взаимодействия спай прочнее одного или обоих материалов. Разрушение происходит в глубине одного из тел.

При изнашивании разрушение поверхностей может происходить в субмикроскопических масштабах, когда вместе со смазочным материалом или воздухом уносятся обломки кристаллических образований. Продукты износа участвуют в процессе изнашивания в качестве промежуточной среды между поверхностями трения.

Перенос материала с одной поверхности на другую свойствен всем видам трения, кроме трения при жидкостной смазке. Перенос материала на металлическую поверхность может играть роль стимулятора коррозии металлической поверхности. Перенесенная частица может многократно переходить с одной поверхности трения на другую и обратно. Износ будет в том случае, если перенесенная частица уйдет из зоны трения. Это связано с процессами прямого и обратного переносов и зависит от конечного механизма отрыва перенесенной частицы, в частности, от ее окисления или же от возникновения неблагоприятных напряжений на границе раздела между частицей и подложкой. Перенос металла является одним из необходимых условий обеспечения ИП.

Причины усталости поверхностного слоя деталей усматриваются в повторных или знакопеременных движениях машин. Изнашивание твердых тел силами трения родственно разрушению их от усталости.

Продукты износа – основной признак изнашивания. Это относится к одной составляющей изнашивания – к диспергированию. Другая составляющая изнашивания – смятие поверхностей. Причем диспергирование и смятие действуют совместно.

Такие представления не могут быть полными без учета взаимодействия сопряженных тел со средой.

9.5 Механическое изнашивание эластомеров

Перемена направления движений пар трения уменьшает износостойкость как при трении скольжения, так и при трении качения. Знакопеременные сдвиговые деформации влияют на динамику изменения свойств и взаимодействие поверхностно-активных присадок с дислокациями. Введение поверхностно-активных веществ в смазочный материал снижает отрицательный эффект реверса при трении металлов.

При добавлении в смазочный материал поверхностно-активных веществ уменьшается сила трения и поверхностные (упругие) деформации.

Эффект Ребиндера при реверсивном трении проявляется в большей степени в результате расшатывания микроструктуры металла. В случае реверса наклеп поверхностного слоя больше, чем при одностороннем трении, но только на первых этапах работы. Дальнейшее знакопеременное деформирование исчерпывает возможности упрочнения микрообъемов, расшатывает их микроструктуру и вызывает интенсификацию усталостных процессов. Разупрочнение поверхностных слоев наблюдается не только при реверсивном трении, но и при одностороннем при тяжелых режимах.

При реверсивном трении, легче возникает режим ИП, чем при трении с односторонним движением.

Взаимодействие полимеров и резины с металлической поверхностью может быть либо механическим, либо молекулярным. Последнее проявляется только в виде адгезии. Зацепление неровностей поверхностей играет большую роль, так как пластическая деформация поверхностного слоя полимера под воздействием неровностей металлической поверхности, повышая число пятен контакта, увеличивает количество зацеплений.

Это вторично стимулирует развитие пластической деформации активных слоев. В результате значительно возрастает сила трения. Если материал эластичный, то при прочих равных условиях шероховатость металлической поверхности не оказывает такого влияния, так как при отсутствии пластической деформации на перемещение затрачивается меньшая работа.

Если адгезия значительна, то разрушение возникающей связи возможно, как по полимеру, так и по металлу. В итоге будет перенос материала с полимера на металл, с металла на полимер или одновременно с одной поверхности на другую. Это также объясняет наблюдаемое изнашивание более твердого металла более мягким полимерным материалом.

Полимерные материалы часто оказываются эффективными как покрытия или облицовочный материал в узлах трения, где, казалось бы, нужно применять особо твердые материалы. Некоторые полимеры могут поглощать большое количество энергии, прежде чем от их поверхности отделится частица. Преимуществом полимера является еще и то, что он не подвержен коррозии.

Для уменьшения трения и снижения износа полимерного материала в него добавляют различные активные вещества, которые в процессе трения взаимодействуют с рабочими поверхностями пары трения.

Износостойкость и коэффициент трения полимеров при работе со сталью зависят от материала пресс-формы, в которой формуется полимерная деталь.

На коэффициент трения и интенсивность изнашивания полимеров может оказать влияние гамма-облучение. При увеличении дозы облучения коэффициент трения и интенсивность изнашивания снижаются. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к ухудшению антифрикционных характеристик полимера и переходу от пластического отеснения материала к микрорезанию.

На процесс трения между металлом и полимерными материалами влияет температура. С повышением температуры ухудшаются упругие и пластические свойства материала и в зависимости от величины температуры происходят физико-химические процессы распада органического связующего или самого материала. Кроме того, если пластик обладает высокой адгезией к металлу, то с повышением температуры адгезия усиливается. У пластиков со слабой адгезией к металлу силы трения с повышением температуры увеличиваются незначительно.

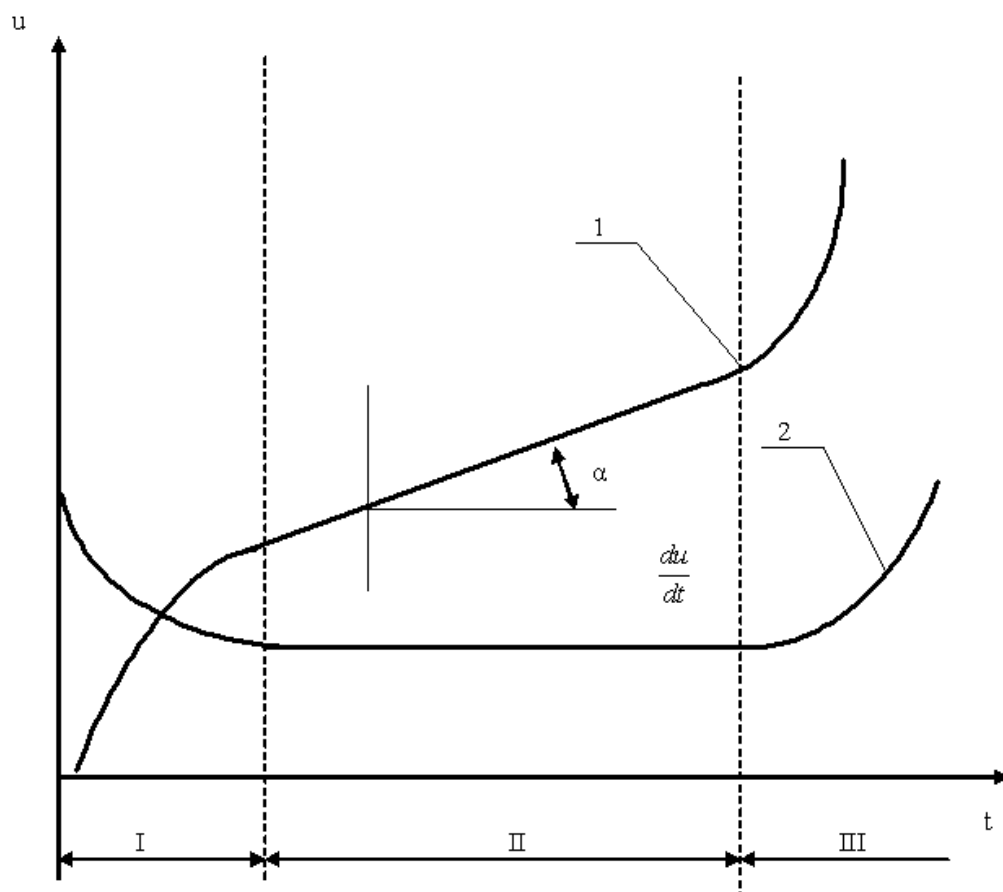
Высокоэластичные материалы повреждаются при трении вследствие усталостного разрушения поверхностных слоев под действием повторных нормальных напряжений и сил трения. Разрушение происходит путем отрыва. Менее эластичные материалы повреждаются вследствие микрорезания, царапания, отслаивания и выкрашивания.

Химические факторы в процессе изнашивания проявляются своеобразно. При повреждении поверхности полимера происходит разрушение отдельных молекулярных цепей, освобождаются свободные валентные радикалы и выступают наружу отдельные элементы в атомарном состоянии, что позволяет металлу и полимеру вступать в химическое взаимодействие. Образующиеся соединения разрушаются и возникают вновь.

В целом процесс изнашивания неметаллических материалов в паре с металлами или неметаллами не отличается от механизма изнашивания металлических материалов, но отдельные его закономерности обязаны особенностям физико-химических и механических свойств неметаллов и их изменениям в процессе трения.

9.6 Стадии изнашивания пар трения

Если отложить по оси абсцисс время t работы пары трения (рисунок 11.3), а по оси ординат износ u , то получим кривую изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона α , образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.



1 – теоретическая кривая изнашивания; 2 – скорость изнашивания

Рисунок 9.6 – Кривые изнашивания

На кривой изнашивания в общем случае (кривая 1) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания:

I – начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке детали;

II – (прямолинейный участок кривой) установившееся изнашивание $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$, наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения;

III – процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания.

Кривая 2 изображает скорость изнашивания; определяется как отношение износа детали (образца) к обусловленному пути на котором происходило изнашивание.

Детали после сборки сопрягаются по выступам неровностей поверхностей, и площадь их фактического контакта в начальный период трения мала, поэтому при нагружении пары трения действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация; неровности поверхности частично сминаются и частично разрушаются как по выступам, так и по впадинам. Срабатывание микронеровностей и сглаживание макронеровностей и волнистости поверхностей сопровождается увеличением несущей поверхности, интенсивность изнашивания снижается. Вместе с тем «пропахивание» поверхностей взаимно внедрившимися

объемами и продуктами износа в направлении относительной скорости поверхностей создает новые неровности, ориентированные вдоль направления движения и не совпадающие с направлениями обработочных рисок. По истечении определенного времени при неизменных условиях работы создается стабильная шероховатость поверхностей трения. Она может быть больше или меньше начальной шероховатости: более грубые поверхности в процессе приработки выглаживаются, а гладкие становятся более грубыми. Каждая из сопряженных поверхностей к концу приработки приобретает свойственную ей шероховатость в данных условиях трения. Микротвердость поверхностей трения к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния.

Процесс установившегося изнашивания заключается в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на отдельных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами. Износ деталей может существенно изменять свойства сопряжения. Увеличение зазоров в сочленениях ухудшает условия жидкостной смазки и может повысить фактор динамичности, а истирание цементованного или поверхностно-закаленного слоя открывает поверхности с пониженной износостойкостью.

Эти и подобные им обстоятельства могут вызвать при дальнейшей работе сопряжения увеличение интенсивности изнашивания и привести к отказу соединения.

Бывают случаи, когда после окончания приработки постепенно накапливаются факторы, ускоряющие изнашивание, в силу чего отсутствует установившийся период; а также случаи, когда отсутствует приработка, и период нормальной эксплуатации наступает сразу с начала работы. Кривые различаются зависимостями изменения скорости от времени. Эти закономерности износа характерны для инструмента и рабочих органов машин.

Возможны явления, когда детали, находящиеся под действием контактных напряжений, работают длительное время практически без истирания. Начавшееся усталостное выкрашивание поверхностных слоев усиливается действием продуктов разрушения.

Кривая изнашивания на самом деле не может быть плавной линией. Это связано с тем, что изменение физико-механических свойств поверхности накапливается за промежутки времени, на протяжении которого непосредственному разрушению подвергается малое число участков, и лишь после того, как количество изменений достигает определенного предела, разрушением охватывается большая часть поверхности, так процесс при установившейся скорости изнашивания циклически повторяется. В таком понятии кривая изнашивания должна была бы представлять собой непрерывную совокупность криволинейных отрезков с неубывающими ординатами.

Кривая *I* на рисунке 9.7 построена в предположении непрерывности работы пары трения от начала приработки до полной выбраковки либо до ремонта. Подавляющее большинство пар трения работает с перерывами, хотя бы вследствие остановки машины.

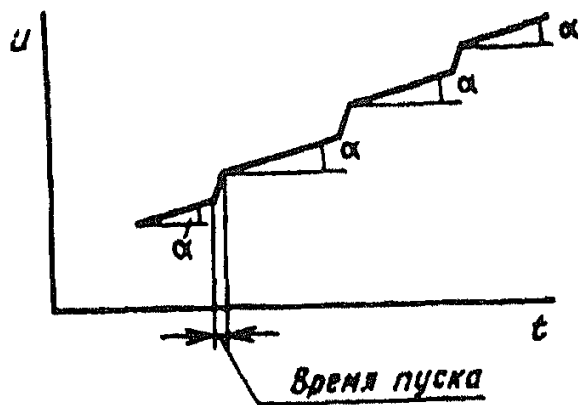


Рисунок 9.7 – Участок кривой изнашивания в период нормальной эксплуатации машины с перерывами в работе

Скорости изнашивания в периоды выбега и разбега выше, чем при установившемся режиме. В некоторых случаях износ за один пуск машины может оказаться равнозначным износу за несколько часов ее работы на установившемся режиме. Ступенчатая ломаная может быть заменена прямой, но ее угловой коэффициент, равный средней скорости изнашивания за определенное время работы пары, будет превосходить скорость изнашивания при непрерывном установившемся режиме.

10 Измерение износа и его распределение между деталями

10.1 Измерение износа и расчёт характеристик изнашивания

Измерение величины износа производят различными методами, в основе которых лежит требование минимальной затраты времени, возможности улавливания износа за короткий промежуток времени, минимального количества разборок и сборки сопряжений.

а) Метод микрометража заключается в измерении микрометрами, индикаторами и другим мерительным инструментом линейного износа. Преимущества этого метода: простота, доступность, возможность дифференцировать износ по разным точкам поверхности. Недостатки метода: относительно большая погрешность приборов;

б) Методом взвешивания измеряют суммарный износ (суммарную потерю массы) по поверхности трения. Преимущества этого метода: простота, доступность, относительно высокая точность. Недостатки метода: невозможность дифференцирования износа по разным точкам поверхности; необходимость разборки сопряжения для каждого взвешивания.

в) Метод обнаружения продуктов износа в масле. Суть его заключается в том, что периодически отбирают пробы масла и по количеству находящихся в нем продуктов износа судят о степени износа. Количество продуктов износа в масле определяют химическим или спектральным анализом. Преимущества этого метода: возможность измерения износа без разборки сопряжения; высокая чувствительность. Недостатки метода: невозможность определения износа каждой детали в отдельности.

г) Методом радиоактивных индикаторов определяют износ детали по интенсивности радиоактивного излучения изотопов, удаляемых с поверхности трения вместе с продуктами износа. Материал изнашиваемых деталей предварительно активируется. Преимущества этого метода: возможность измерения износа без разборки сопряжения, раздельного (дифференцированного) измерения износа деталей сопряжения. Недостатки метода: сложность; необходимость специального оборудования, помещения, защитных и очистных устройств и т.д.

д) Методом встроенных датчиков определяют износ детали по изменению линейных размеров (или положения) этой детали, фиксируемому датчиком, встроенным в сопряжение. Преимущества метода: относительно высокая точность; возможность непрерывного или периодического измерения износа. Недостатки: сложность метода, потребность в специальном оборудовании.

е) Метод искусственных баз. Этим методом величину износа определяют по изменению размеров суживающегося углубления (профиль которого известен), выполненного на изнашивающейся поверхности (рисунок 10.1). Такими углублениями могут быть высверленное коническое отверстие, отпечатки в форме конуса или пирамиды, вырезанная лунка.

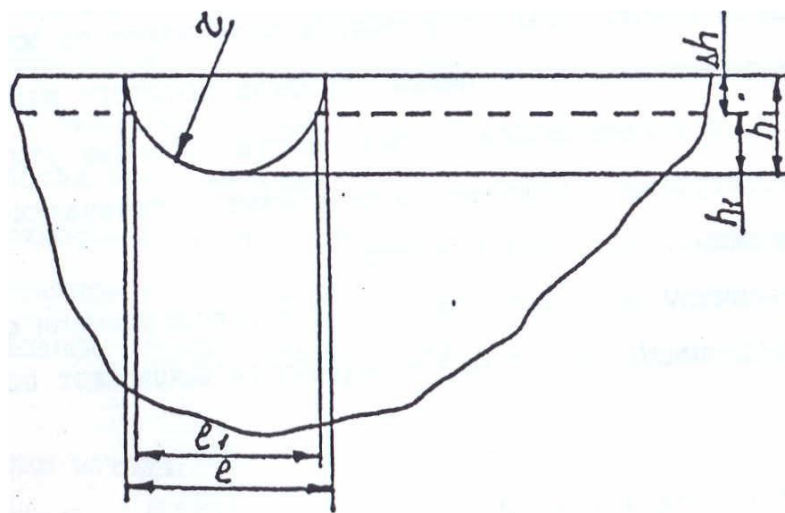


Рисунок 10.1 – Схема измерения износа методом вырезанных лунок

Величину износа плоской поверхности методом врезанных определяют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{l^2 - l_1^2}{8r},$$

где l и l_1 – длина лунки до и после изнашивания;

r – радиус, описываемый вершиной резца.

Износ лунки, находящейся на поверхности цилиндрической образующей, вычисляют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = 0.1259(l - l_1^2) \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{R} \right),$$

где R – радиус кривизны поверхности в месте нанесения лунки;

плюс – для выпуклых, минус – для вогнутых поверхностей.

Преимущества метода искусственных баз: высокая точность; возможность определения износа в разных точках. Недостатки, метода: местное вспучивание и искажение формы лунок; высокая трудоемкость; необходимость разборки узла; наличие специальных приборов для нанесения отпечатков и лунок, и измерения их размеров.

10.2 Распределение износа между деталями

Если материалы нескольких пар трения одинаковы, то при прочих равных условиях их износ (в пределах обычных колебаний) будет одинаковым. Если же материалы деталей разные, то и износы по массе и размерам будут различны. Интенсивность изнашивания каждой детали определяется его видом. Может случиться, что при одном виде изнашивания более интенсивно изнашивается одна деталь, а при другом виде изнашивания – другая. При одинаковых материалах износы поверхностей по массе не одинаковы: большая поверхность теряет больше массы.

Первая гипотеза предложена применительно к вращающемуся плоскому кольцу машин трения и сопряженными с ним по торцам трем неподвижным цилиндрическим образцам. Элемент поверхности кольца перед вступлением в контакт подвергается сжатию в соответствии с направлением сил трения, а после выхода из контакта – растяжению. На поверхности трения кольца за один оборот происходит три смены знака напряжения, в то время как на поверхности неподвижных образцов знак напряжения остается постоянным. Согласно этой гипотезе перемена знака напряжений является «ответственной» за повышенный износ кольца.

По второй гипотезе, образец с малой площадью трения уподобляется резцу, на котором при резании образуется нарост металла с высокой твердостью и прочностью при некоторых температурах, который царапает и изнашивает образец с большей площадью.

Основную причину большего износа по массе цилиндрических втулок двигателей внутреннего сгорания по сравнению с износом поршневых колец также объясняют тем, что путь абразивных частиц во втулке в несколько раз превышает путь их по кольцу.

Третья гипотеза исходит из того, что разрушение при изнашивании происходит в отдельных «слабых» местах пятен контакта. Эти слабые места присущи материалу изделия и вновь создаются в результате деформации поверхностного слоя. Большая поверхность имеет больше слабых мест, поэтому она быстрее изнашивается.

Поскольку на отношение износов трущихся поверхностей решающее влияние оказывают условия трения, то по этому отношению можно приближённо определить условия работы реальных деталей и, наоборот, по условиям работы реальных деталей определить отношение их износов.

Решающим в процессе изнашивания деталей с неравновеликими поверхностями является распределение теплоты между деталями. Быстрее изнашивается тело, которое быстрее вращается, а, следовательно, более интенсивно охлаждается.

В результате износа видоизменяется микрогеометрия поверхности трения; она приобретает новую конфигурацию или изменяются ее размеры. Для характеристики макроизменений на сопряженных поверхностях целесообразно все пары трения разбить по кинематическим признакам и условиям контактирования поверхностей на семь групп.

Первая группа охватывает пары трения скольжения с осесимметричными поверхностями, находящимися в одновременном контакте по всей номинальной площади касания; осью симметрии является ось вращения одной из поверхностей при неподвижной другой. К этой группе относятся плоские и кольцевые пяты, диски и конусы фрикционных муфт и тормозов. Для пар этой группы скорости скольжения всех точек, расположенных на круговой траектории произвольного радиуса, равны. Поэтому при центрально действующей осевой силе и осесимметричной жесткости сопряженных деталей распределение износа на каждой поверхности трения будет тоже осесимметричным. Осевое сечение детали дает представление о форме изношенной поверхности.

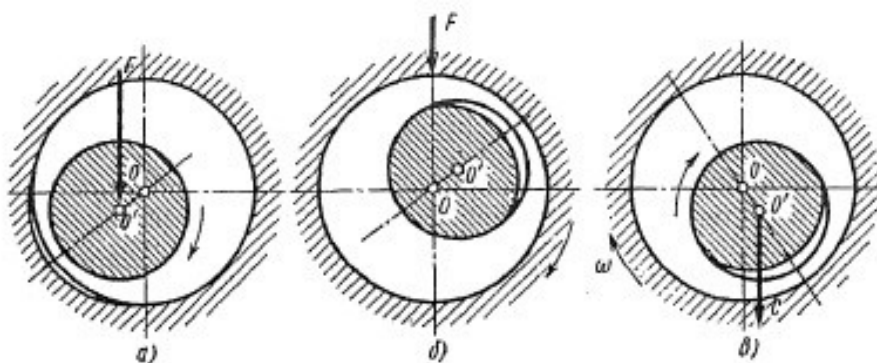
Если вследствие неточностей монтажа или по другим причинам приложенная осевая сила эксцентрична, то давления в точках, лежащих на одной круговой траектории, уже не будут одинаковы. Износ вращающейся поверхности по-прежнему будет осесимметричным, так как любая точка круговой траектории за один оборот подвергается воздействию давления в одинаковой последовательности. У неподвижной поверхности будет наблюдаться неравномерность износа не только в осевых сечениях, но и на круговых траекториях.

Во вторую группу входят вращательные пары, в которых одна поверхность трения подвергается местному нагружению, а сопряженная с ней – циркуляционному нагружению при постоянной силе (рисунок 10.2). Деталью этой группы являются подшипники, цапфы и колодочные тормоза.

Местным нагружением круговой цилиндрической поверхности называют такой вид нагружения, когда радиальная нагрузка воспринимается одним и тем же ограниченным участком поверхности. Циркуляционное нагружение – вид нагружения, когда вращающаяся цилиндрическая поверхность нагружается радиально-последовательно по всей окружности.

При действии постоянной радиальной силы вращающийся вал подвергается циркуляционному нагружению, а подшипники – местному. При любой эпюре дав-

лений рабочая поверхность вала будет изнашиваться равномерно по окружности, а износ подшипника будет односторонним. При граничной смазке и трении без смазочного материала зона износа подшипника смещена от приложенной силы в направлении, противоположном движению, а при жидкостной или полужидкостной смазке – в сторону движения. Если сила, сохраняя постоянство направления, изменяется по величине на различных установившихся режимах работы машины, то в связи с перемещениями по окружности нагруженной области подшипника зона его одностороннего износа расширится.



а – циркуляционное нагружение вала и местное нагружение подшипника; б – вращающийся подшипник нагружен постоянной радиальной силой F , вал неподвижен; в – вращающийся вал нагружен центробежной силой C

Рисунок 10.2 – Вращательные пары второй группы

Если постоянная сила действует на вращающийся подшипник при неподвижном вале (рисунок 10.2б) или центробежная сила нагружает вращающийся вал при неподвижном подшипнике (рисунок 10.2в), то подшипник изнашивается равномерно по окружности в любом поперечном сечении, а вал односторонне.

На рисунке 10.3 показано влияние макро отклонений в виде бочкообразности на форму изнашиваемых поверхностей при циркуляционной нагрузке на шейку вала. АБВ – образующая растачивания. Начальное положение вала показано штриховыми линиями. При начальном сопряжении цилиндрической шейки с расточенным бочкообразно подшипником (рисунок 12.3а) вал контактирует с поверхностью подшипника только на площадках вблизи точек А и В, откуда начинается осесимметричный износ вала и местный износ подшипника. По мере износа область контакта по длине расширяется вплоть до полного контактирования по всей длине подшипника. Рабочие поверхности деталей в осевых сечениях приобретают форму A_1B_1 – кривых двоякой кривизны.

Бочкообразная шейка (рисунок 10.3б) начинает изнашивать подшипник с середины. Если бочкообразность мала и контакт происходит по всей длине шейки при большей деформации посередине, то изнашивание протекает по всей длине, но с большей интенсивностью посередине. Бочкообразность вала уменьшается с ростом пути трения, а подшипник в зоне нагружения приобретает вогнутость по длине. Не-

трудно получить представление об эффекте, производимом перекосом осей и деформацией шейки под изгибающей нагрузкой.

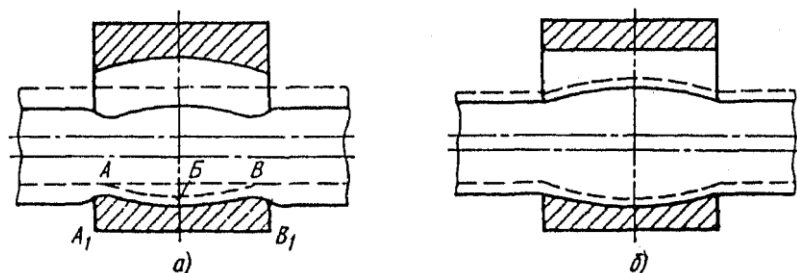


Рисунок 10.3 – Влияние бочкообразности одного из элементов вращательной пары на конфигурацию деталей

К третьей группе относят вращательные пары с неравномерным износом по окружности обеих поверхностей трения. Разумеется, в неё входят и шарниры, т.е. вращательные пары с углом относительного качения звеньев менее 360° .

Причиной износа является особенность подвода смазочного масла. Механические частицы, имеющиеся в масле, отбрасываются под действием центробежной силы к верхней образующей канала, в первую очередь – более крупные частицы, так как мелким труднее преодолеть сопротивление вязкости масла. Выйдя из канала, частицы увлекаются потоком масла, причем значительно большая концентрация частиц имеется на стороне противоположной наклону канала. Частично происходит их внедрение в баббитовый слой вкладыша, в результате усиливается абразивное изнашивание шейки.

Четвертая группа объединяет направляющие скольжения прямолинейного движения столов, суппортов, ползунов и аналогичного типа деталей металлорежущих станков, кузнечно-прессового оборудования, поршневых двигателей и других машин.

Четвертую группу можно разделить на две подгруппы. В первую входят пары трения с длиной хода большей, чем длина направляющих суппорта (ползуна). Это пары, в которых при неравных площадях трения поверхность меньшей площади все время контактирует с сопряженной поверхностью на различиях ее участках в последовательности, зависящей от назначения и условий использования машины. Износ направляющих станин этой подгруппы по длине неравномерен по различным причинам.

Вторую подгруппу образуют пары, у которых направляющие станины имеют ограниченную длину, суппорт свешивается с них при своем движении. Номинальная площадь контакта пар непостоянна; вследствие этого, а также в связи с изменениями во взаимном положении приложенных и реактивных сил эпюра давлений переменна на участках свешивания.

Пятую группу образуют цилиндры, поршни и поршневые кольца паровых машин, двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, цилиндрические золотники, золотниковые втулки и кольца.

Цилиндры вертикальных паровых машин изнашиваются под действием сил упругости поршневых колец и давления пара. В мертвых точках давление пара наибольшее, скорость скольжения равно нулю, а вблизи мертвой точки мала. В середине хода скорость близка к максимальной, давление пара снижается. Распределение износа по длине хода поршня зависит от того, какой фактор (давление на стенку или скорость) является превалирующим в данных условиях изнашивания. При обычной точности изготовления и сборки и нормальной эксплуатации больше изнашивается средняя часть цилиндра, его рабочая поверхность принимает бочкообразную форму.

Шестая группа – винтовые пары. Это, в первую очередь, передача винт-гайка. Среднее давление в паре трения передаточный винт-гайка мало. Распределение износа в радиальном направлении связано с деформацией деталей под нагрузкой, а по длине – с раздачей усилий по виткам гайки и изменениями в раздаче с течением времени.

К седьмой группе относят зубчато-винтовые передачи. Неравномерность износа зубьев цилиндрических прямозубых колёс по длине обусловлена неравномерным распределением нагрузки, вызванным упругими деформациями валов и колёс, несимметричным расположением венца относительно ступицы и погрешностями обработки и сборки деталей передачи.

11 Теории изнашивания

11.1 Физико-механические модели износа при усталостной и энергетической теориях

В основу теории фрикционной усталости как механизма изнашивания при трении положены следующие фундаментальные факты экспериментальной трибологии:

а) Дискретный характер фактического поля сил контактного взаимодействия, возникающий как прямое следствие микро- и макрогеометрических несовершенств строения поверхностного слоя (ПС) реальных тел, а также микронеоднородности физических свойств приповерхностных слоёв.

б) Наличие в трибологической системе (ТС) стационарного режима изнашивания, занимающегося условиях нормальной работы основную долю ресурса сопряжения и характеризуемого постоянством во времени всех интенсивных параметров процесса.

в) Существование в процессе изнашивания критических точек.

г) Усталостный характер фрикционного разрушения. Фрикционное взаимодействие не приводит к прямому разрушению. Элементарный акт поверхностного разрушения проявляется как процесс порогового типа с латентным периодом, длительность которого намного больше периода между единичными фрикционными взаимодействиями и возрастает с уменьшением нагрузки.

В энергетической теории износа условие разрушения определяется накоплением в критическом объёме материала предельной для данного типа структуры плотности энергии (с учетом энергии, запасенной в начальном состоянии); эта энергия, близкая к энергии плавления, является константой материала не зависит от вида напряженного состояния. Однако она сильно зависит от вида изнашивания, которым определяется критический объем, ответственный за разрушение. Корректное нахождение предельной плотности накопленной энергии практически возможно пока только для случая прямого микрорезания. В теории, основанной на термодинамическом подходе вводится энтропийный критерий разрушения. Термофлуктуационный вариант теории дополняет механический критерий усталостного разрушения фрикционного контакта.

В частности, для трения полимеров, у которых влияние термохимических эффектов на состояние материала и кинетические особенности его поведения проявляются уже при сравнительно низких температурах. Эти представления приводят к утверждению активационного характера всякого процесса разрушения, для осуществления которого необходимо подвести энергию, превосходящую некоторый барьер, относительная величина которого переменна и управляется не только механическим напряжением, но и температурой. Количественная модель фрикционной усталости, основанная на механическом критерии разрушения, которым постулируется некая неотрицательная функция – мера повреждения, зависящая от условий нагружения и свойств материала. Она отражает накопление повреждений при циклическом нагружении, приводящее к локальному нарушению сплошности материала и его отделению в виде частиц износа.

11.2 Модель усталостного разрушения поверхностей при изнашивании

Интенсивность изнашивания материала при усталостном изнашивании выражается формулой

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta V_k}{A_k L} = i \frac{A_\phi}{A_k},$$

где Δh – толщина изношенного слоя;

L – путь трения;

ΔV_k – контурный объём изношенного материала;

A_k – контурная площадь поверхности контакта;

A_ϕ – площадь фактического контакта;

i – удельный износ, представляющий собой фактический объём изношенного материала Δv_ϕ , делённый на площадь фактического касания и отнесённый к пути трения, равному диаметру пятна касания d ;

$$I = \Delta v_\phi / (d A_\phi).$$

Принимаем объём деформируемого материала равным объёму внедрённых микронеровностей и получаем:

$$I = \frac{h^*}{(v+1)nd} \cdot \frac{A_{\phi}}{A_K},$$

где h^* – максимальное абсолютное внедрение микронеровностей твёрдого тела.

Фактическая площадь касания A_{ϕ} и максимальная глубина внедрения h^* зависят от упруго-пластических свойств материалов, формы и распределения микронеровностей, нагрузки.

11.3 Разработка новой теории трения и безызносности

В последние годы установлено, что при глубокой неравновесности и нелинейности возможна самоорганизация и образование структуры системы трения иного порядка, чем трение при граничной смазке. Таким образом, выявилась возможность работы при более совершенной системе, чем трение при граничной смазке, а одновременно и возможность существования разных (двух) систем трения – приграничной смазке и ИП.

Некоторые открытые системы при переходе от равновесных условий к условиям, далеким от равновесных, становятся неустойчивыми и их макроскопические свойства радикально меняются. Такими свойствами обладают многие биологические системы, причем во всех случаях существует, видимо, термодинамический порог самоорганизации, четко разграничивающий класс равновесных структур и класс структур, называемых диссипативными, возникающих лишь при больших отклонениях от равновесия.

Применительно к трению твердых тел, которое всегда диссипативно, это означает переход за некоторую критическую зону, где при больших отклонениях от равновесного состояния физические системы ведут себя, как правило, нелинейно. Именно здесь проявляются самоорганизация и когерентное поведение подсистем, выражающееся в образовании систем снижения износа и трения (СИТ).

Процесс превращения механической энергии в тепловую происходит в поверхностном слое, деформируемом при трении на относительно небольшую глубину (приблизительно 0,1-0,3 мм) в зависимости от скорости скольжения и нагрузки. В этой зоне, являющейся генератором теплоты, возникают максимальные температуры и напряжения, происходит накопление энергии в виде концентрации дислокаций и других дефектов решетки, ведущих к разрушению. Эта зона интенсивного воздействия силы трения на металл является ловушкой для водорода. Зона же контакта поверхностей является генератором водорода из влаги, воздуха, смазочного материала, пластмассы и других материалов и элементов среды. Изнашивание обусловливается не столько механическим взаимодействием поверхностей трения, сколько водородной хрупкостью поверхностного слоя.

Из изложенного ясно проступают черты новой концепции трения, основанной на глубокой теоретической проработке раздела физики – термодинамики образования самоорганизующихся структур при необратимых процессах. Как подтвердила практика, термодинамические процессы диссипации энергии трения оказались более фундаментальными, чем процесс разрушения поверхностей.

11.4 Методы повышения износостойкости деталей машин

С помощью расчетных методов можно выбрать и обосновать оптимальные конструктивные параметры деталей, обеспечивающие минимальную скорость изнашивания; установить предельные износы деталей; подобрать износостойкие материалы и методы их упрочнения.

Конструктивные возможности улучшения условий трения крайне разнообразны. К числу наиболее эффективных конструктивных способов улучшения условий трения можно отнести следующие:

- снижение контактной нагруженности;
- устранение возможности схватывания поверхностей;
- замена сухого трения граничным, граничного трения – режимом гидродинамического или гидростатического трения;
- уменьшение работы трения;
- улучшение температурного режима трения;
- защита узлов трения от абразивных частиц;
- защита узлов трения от химических агентов внешней среды.

Защита узлов трения от абразивных частиц осуществляется с помощью различных систем масляных и воздушных фильтров, которые обеспечивают очистку масла и воздуха, поступающих к поверхностям трения.

Герметизирующее устройство (ГУ) – совокупность деталей, образующих конструкцию, предназначенную для герметизации узла трения (предотвращения утечки смазки и защиты от проникновения извне абразивных частиц). Герметизирующие устройства делятся на подвижные и неподвижные, контактные и бесконтактные: манжеты; торцевые уплотнения; поршневые кольца; набивочные (сальниковые) уплотнения; лабиринтовые уплотнения; прокладочные герметизаторы различных типов и др.

На работоспособность герметизирующих устройств влияют:

- 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 её от температуры и давления, особенности поведения в узких зазорах и т.д.);
- свойства материалов сопряжённых 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.).

Один из способов конструктивного обеспечения износостойкости – создание конструкций с равностойкостью изнашивающихся деталей. Термин «равностойкость» для изнашивающихся деталей имеет примерно такой же смысл, как понятие «равнопрочность» для силовых элементов машин.

Неравномерность изнашивания рабочих поверхностей деталей приводит к преждевременной потере работоспособности всего изделия при неполном использовании ресурса отдельных деталей, является одной из причин снижения их прочности вследствие образования концентраторов напряжений. Для обеспечения равностойкости изнашивающихся деталей необходимо изучать эпюры износа деталей, применять расчетные методы прогнозирования износа.

Оптимизация формы изнашивающихся деталей представляет собой один из важных приемов обеспечения конструкционной износостойкости и сводится к выявлению износа деталей в каждой точке их контакта, построению эпюр контактных давлений и созданию геометрических форм деталей, обеспечивающих максимальный срок службы. Оптимизация формы деталей может происходить также в процессе изнашивания в результате выравнивания начальной эпюры скоростей изнашивания при опережающем изнашивании отдельных участков трущейся поверхности.

Компенсация износа, позволяющий обеспечивать постоянство показателей работоспособности изнашивающихся деталей несмотря на их износ. Компенсация износа в машинах может осуществляться тремя способами: вручную, путём самокомпенсации и автоматической компенсации.

Ручная компенсация как регулировочная операция осуществляется перемещением частично изношенной детали на величину, износа следующими способами: перемещением клиньев, сменой прокладок; поворотом детали, перемещением детали в специальных пазах и т. д.

Самокомпенсация износа происходит при перемещении детали по мере изнашивания под действием упругого элемента, гравитационной силы, гидравлического давления и т. д.

Автоматическая компенсация износа заключается в фиксировании износа (или его косвенного признака) каким-либо датчиком, подающим команду исполнительному механизму для корректировки положения изнашивающихся деталей специальным механизмом с собственным приводом.

Влияние шероховатости поверхности сопряженных деталей на износ начинает проявляться в процессе их приработки, в течение которой происходит изменение размеров и формы неровностей, а также их направления. Для сокращения срока приработки, а, следовательно, и величины износа деталей в процессе приработки необходимо применять такой метод обработки детали в процессе её изготовления, чтобы полученная при этом шероховатость была максимально близкой к оптимальной шероховатости, устанавливающейся при нормальной работе детали в узле трения.

При обработке резанием на 20 %-30 % увеличивается твердость обработанной поверхности в результате образования упрочненного слоя глубиной 0,05-0,5 мм. Кроме того, в поверхностном слое появляются остаточные напряжения сжатия величиной 3000-7000 кПа, положительно влияющие на износостойкость деталей.

С увеличением скорости резания до 25 м/мин шероховатость поверхности возрастает, при дальнейшем ее увеличении – снижается, что, в свою очередь, повышает износостойкость и коррозионную стойкость обработанных поверхностей. Одновременно увеличение скорости резания до определенных пределов приводит к увеличению толщины наклепанного слоя. При высоких скоростях (200-600 м/мин) возникает разупрочнение, которое уменьшает глубину наклепа, снижает предел выносливости.

С увеличением подачи увеличивается шероховатость поверхности, что отрицательно оказывается на износостойкости. С другой стороны, с увеличением подачи возрастают глубина наклепа и остаточные напряжения сжатия, что повышает усталостную прочность.

С уменьшением глубины резания шероховатость поверхности незначительно снижается, однако это не оказывает существенного влияния на износостойкость.

Смазочно-охлаждающая жидкость улучшает отвод тепла от зоны резания, уменьшает трение и налипаемость стружки, что способствует снижению шероховатости и повышению износостойкости поверхности.

Применение инструментов с отрицательными передними углами от 15° до 45° способствует образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, что повышает предел выносливости. Биение режущего инструмента вызывает волнистость и снижает эксплуатационные свойства обработанных деталей.

Поверхностное пластическое деформирование способствует, как правило, предварительному упрочнению (наклепу) металла поверхностного слоя, повышению его твердости и износостойкости.

Алмазное выравнивание применяют для обработки сталей, цветных металлов и сплавов. Обкатывание и раскатывание поверхности применяют для обработки цилиндрических поверхностей, галтелей, плоских и фасонных поверхностей. Виброобкатыванием добиваются получения различных видов рельефа на поверхностях, с помощью которых можно как; увеличивать маслостойкость контакта при работе со смазочным материалом, так и уменьшать поверхность контакта при работе без смазочного материала.

Для образования твердого износостойкого слоя на определенных участках поверхности деталей, изготовленных из средне- и высокоуглеродистых сталей, ковкого, серого и высокопрочного чугуна, применяют поверхностную закалку. Глубина закалки 1,5-2,0 мм. Поверхностная закалка может вестись с нагревом газовым пламенем и токами высокой частоты (ТВЧ).

Химико-термическая обработка применяется для улучшения антифрикционных свойств металлов и повышения их износостойкости путем диффузионного насыщения или модифицирования их соединениями химически активных элементов.

Химико-термическая обработка делится на две основные группы:

- 1) химико-термические виды обработки, применяемые для увеличения износостойкости повышением поверхностной твердости деталей (цементация, азотирование, цианирование, борирование);
- 2) химико-термические виды обработки, предназначенные в основном для улучшения противозадирных свойств металлов путем создания тонких поверхност-

ных слоев металлов, обогащенных химическими соединениями с активными элементами, которые предотвращают схватывание и задиры при трении (сульфидирование, сульфацианирование, селенирование, теллурирование, обработка в иодисто-кадмиевой соляной ванне).

После цементации и закалки детали, слой имеет структуру игольчатого мартенсита с мелкими глобулами карбидов и небольшим количеством остаточного мартенсита, для которой характерна высокая износостойкость.

Азотирование обогащает нитридами поверхностный слой, что повышает износостойкость, сопротивляемость эрозии и кавитации. При нитроцементации и цианировании поверхностный слой получается более износостойким благодаря наличию азота и мелкозернистой структуры. Поверхностная твердость стали после борирования достигает HV 1400-1500, что обеспечивает высокую износостойкость. Глубина борированного слоя 0,12-0,85 мм.

Сульфидирование дает значительный противозадирный эффект и снижает коэффициент трения. Износостойкость повышается в 2-5 раз. При сульфацианировании достигается повышение как противозадирных свойств поверхностей, так и их износостойкости.

Хромовое покрытие имеет высокую твердость (HV 1000-1100), низкий коэффициент трения, что значительно снижает тепловыделение при трении. Износостойкость твердого гладкого хромового покрытия в 5-15 раз выше, чем стальных деталей. Хромирование применяют также для восстановления изношенных деталей.

Осталивание, широко используемое для восстановления изношенных поверхностей стальных и чугунных деталей, более производительное, недорогое. Твердость достигает 600-650 HV.

Покрытие после никелирования имеет меньшую твердость, чем хромовое, однако оно хорошо обрабатывается резанием и имеет большую вязкость при толщине слоя до 2 мм. Коэффициент трения подобного покрытия по чугуну на 30 % ниже коэффициента трения стали по хрому. При сухом трении износостойкость такого покрытия в 2,5-3 раза выше, чем у закаленной стали. Износ сопряженных деталей в 4-5 раз меньше, чем при работе по стали.

Оксидирование – процесс получения оксидных плёнок толщиной более 60 мкм. Данный способ используется для повышения износостойкости зубчатых колёс, деталей двигателей. Износостойкость возрастает в 5 и более раз.

При наплавке происходит сплавление нанесенного слоя с основным металлом, что обеспечивает их хорошее сцепление. Газовая наплавка используется для упрочнения деталей, рабочие поверхности которых должны иметь большую твердость и высокую износостойкость. Электродуговая наплавка используется при восстановлении изношенных деталей.

В любом случае важно знать условия эксплуатации и степень их влияния на долговечность деталей. В зоне жаркого климата, при высокой температуре воздуха снижается его плотность, вследствие чего ухудшается работа, двигателей внутреннего сгорания, уменьшается их мощность и топливная экономичность; повышается температура масла в картере двигателя, в картерах трансмиссии и в других узлах и агрегатах, что отрицательно сказывается на смазывающих качествах масла. Ухудшение качества смазки, ее утечка ведут к резкому увеличению износа в трущихся

сопряжениях. Высокая запыленность воздуха сильно влияет на интенсивность изнашивания всех узлов и агрегатов. В пыли содержится до 82 % кварца и корунда, которые обладают высокой твердостью и вызывают абразивный износ трущихся деталей.

Эксплуатация машин в условиях жаркого климата показала, что интенсивность изнашивания деталей машин в этой зоне в 2-10 раз выше, чем в зоне умеренного климата.

12 Трещинообразование на поверхностях трения

12.1 Усталостное изнашивание металлического антифрикционного слоя подшипников скольжения

Усталостное изнашивание антифрикционного слоя происходит в подшипниках, подвергавшихся длительному нагружению переменными по направлению и величине усилиями. Принципиально для этого достаточно переменности одного из факторов. Наличие жидкостной смазки не служит помехой процессу. Усталостные трещины берут начало на поверхности трения и входят, сужаясь, в глубь слоя. Развиваясь по длине, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. Раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного масла. На более поздней фазе трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между слоем и основанием, в результате отдельные участки поверхностного слоя обособляются от остального слоя, а затем выкрашиваются. Большую роль в отделении частиц, вероятно, играет смазочный материал, который, проникнув в трещину, как бы подрывает металл над ней. Иногда трещина не доходит до стыка и продвигается вблизи него и параллельно ему. Выкрашивание крупных кусков слоя может сопровождаться поверхностными язвинами.

Теория сопротивления усталости подшипниковых сплавов может быть обусловлено касательными напряжениями, относительным удлинением, сопровождающим приложением сжимающей силы, остаточными напряжениями растяжения, возникающими в сплаве в итоге накапливающейся микропластической деформации с увеличением числа циклов, либо совместным влиянием этих факторов. В реальном подшипнике напряженное состояние металла в слое определяется не только приложенной нагрузкой, но и характером деформации корпуса подшипника в целом. Это означает, что если в материале слоя на жестком основании возникали бы под действием радиального усилия только напряжения сжатия, то изгиб корпуса подшипника с переменной знака кривизны вызывал бы растягивающие напряжения.

Сопротивление усталости антифрикционного слоя зависит от режима работы и конструкции подшипника, антифрикционного материала, физических свойств соединения слоя с основанием, жесткости вала и постели под подшипники и др.

Чем выше удельное давление, чем больше амплитуда перемещения соприкасающихся поверхностей, чем быстрее машина, тем быстрее истощается

выносливость подшипникового материала. Влияние роста рабочей температуры подшипника на сопротивление усталости, причем это влияние сказывается как непосредственно, так и через температурные напряжения. С повышением температуры снижаются все показатели механической прочности. Различие в коэффициентах линейного расширения подшипникового сплава и материала основания служит причиной температурных напряжений.

Неравномерность термического расширения в различных кристаллографических направлениях не дает возможности каждому кристаллу в поликристалле свободно расширяться при повышении температуры; это создает основу для образования остаточных напряжений и пластической деформации.

12.2 Трещинообразование: причины, последствия и меры по предотвращению

12.2.1 Трещинообразование термического типа

В тормозных устройствах поглощаются значительные мощности, возрастающие с повышением скорости движения. Требование иметь меньший тормозной путь предопределяет малую длительность торможения и весьма интенсивный нагрев поверхностей с образованием высоких термических напряжений; в результате на поверхностях трения могут появиться трещины.

Образование трещин повышает износ поверхностей трения, острые кромки производят режущее действие, а вблизи кромок происходит выкрашивание материала. Трещины со временем забиваются продуктами износа, действующими как абразив. Выход радиальных трещин на соприкасающуюся с внешней средой цилиндрическую поверхность колец торцовых контактных уплотнений вращающихся валов нарушает герметичность. Быстрый нагрев поверхности трения при большом градиенте температуры по глубине вызывает в поверхностном слое напряжения сжатия. Эти напряжения значительно превосходят по абсолютной величине растягивающие напряжения в остальной части детали и обуславливают при определенных условиях неустойчивость упругого или упругопластического состояния этого слоя.

Этот слой становится подобным сжатой пластине или оболочке из эластичного материала на упругом основании. Неустойчивость исходной формы приводит к образованию гофра. Выступы волнистой поверхности концентрируют нагрузку, происходит их перегрев, они становятся местами подплавления и очагами зарождения трещин.

Образование трещин на поверхностях трения стальных и чугунных деталей в паре с другими материалами и при смазывании углеводородными жидкостями при тяжёлых режимах работы возможно в результате концентрации в зоне контакта диффузионно-способного водорода, который охрупчивает стальную и чугунную поверхности.

Трещины на рабочих поверхностях тормозов высокой энерго-нагруженности признаются неизбежными и на некоторой стадии развития не снижают надежности торможения, поэтому существуют допуски на трещины.

Мерой борьбы с терморастрескиванием может оказаться выбор материала. Чем выше теплопроводность материала, чем меньше температурное расширение, чем пластичнее материал, тем меньше вероятность образования в нем трещин. Склонны к терморастрескиванию хрупкие и обладающие малой теплопроводностью материалы – стекло и керамика, твердые сплавы, закаленные стали. Высокая точность обработки поверхностей трения и тщательная их приработка – дополнительное средство борьбы с растрескиванием.

12.2.2 Трещинообразование на поверхности деталей от перенаклёпа

Такой вид повреждения может встретиться в условиях трения качения, когда твёрдость поверхности не настолько низка, чтобы произошла заметная пластическая деформация, и не настолько высока, чтобы предупредить микропластическую деформацию в пределах всей рабочей поверхности.

12.3 Разрушение поверхности при контактных нагрузках

12.3.1 Контактная усталость при качении и качении со скольжением

Характерным повреждением катящихся под нагрузкой или с проскальзыванием металлических поверхностей являются раковины, ямки, оспинки (так называемые питтинги). Поверхность приобретает местное выкрашивание.

Питтинг – это особый вид повреждения поверхности при перемещающемся контакте под действием переменных напряжений, превышающих некоторый предел для данного материала. Иначе говоря, питтинг – это процесс контактной усталости поверхностей при качении или при качении со скольжением.

Необходимым условием образования питтинга является некоторая степень металлического контакта смазанных поверхностей. При его отсутствии выкрашивание не наступает даже при переменных контактных напряжениях, вдвое превышающих длительный предел контактной выносливости. При некотором числе циклов напряжений и достаточном контактном напряжении образуется первичная микротрещина.

Нормальной силе соответствуют симметричное распределение напряжений относительно линии ее действия и наибольшее касательное напряжение в точке, расположенной на некоторой глубине от поверхности.

Однако субповерхностный слой в большей мере, чем при неподвижном контакте, подвергается пластическому деформированию, результатом чего является неоднородность структуры и остаточные напряжения, что отразится на твердости. Трещина может зародиться на глубине и на поверхности в зависимости от соотношения между нормальной и тангенциальными составляющими силы в контакте и от изменений физико-механических свойств материала в поверхностном слое. Часто трещина начинается на поверхности, на границе зерен.

Если трещина зародилась на глубине, то на известной стадии ее развития она может выйти на поверхность. Первичная трещина распространяется, независимо от пункта ее зарождения, наклонно к поверхности в соответствии с направлением приведенного напряжения и приобретенной благодаря пластической деформации ани-

зотропии материала. В трещину с поверхности проникает масло. Когда открытый конец трещины вступает в контакт с сопряженной поверхностью, выход для масла закрывается. В масле под нагрузкой в контакте возникает высокое давление, распирающее стенки трещины. При повторных нагружениях трещина углубляется, а затем выходит на поверхность, отделяя выкрашивающийся объем металла.

При отсутствии масла образуются начальные трещины такого же характера, но вследствие износа вершин неровностей, на которых начинаются трещины, последние не успевают распространиться вглубь. Поэтому в открытых зубчатых передачах, в которых мало смазочного материала и на поверхности трения оседают абразивные частицы, питтинг наблюдается редко.

При качении со скольжением опережающая (ведущая) поверхность имеет, по различным данным, на 30-100 % более высокий предел выносливости, чем отстающая (ведомая) поверхность из той же стали, мягкой или средней твердости.

Силы трения в контакте на опережающей поверхности направлены против, а на отстающей – по скорости скольжения. Раскрытая трещина на отстающей поверхности 2 развивается навстречу направлению действия. Масло с большой скоростью поступает в трещину и производит на ее стенки распирающее действие, близкое к ударному. Вслед за этим трещина закрывается, и давление на стенки еще больше возрастает. На опережающей поверхности гидродинамическое давление в слое смазочного материала выдавливает масло из трещины. Поэтому на опережающей поверхности питтинг либо совсем не развивается, либо развивается с значительным замедлением.

Контактная усталость материалов определяется физико-механическими свойствами материала, скоростью качения, удельной скоростью скольжения, режимом нагружения, вязкостью масла, способом его подачи, шероховатостью поверхностей и др.

От скорости качения и удельного скольжения зависят напряжения, тепловое состояние зоны контакта и физико-механические изменения поверхностного слоя. Кратковременные перегрузки зубчатых колес, сопровождаемые разрушением масляной пленки повышают контактную прочность вследствие износа материала с зачатками усталостных трещин.

Влияние смазочного материала сложное: повышение его вязкости положительно влияет на нагрузочную способность передачи, однако увеличивает силы трения и касательные напряжения. Контактная прочность зубьев колес при недостаточном смазывании погружением выше, чем при обильной подаче масла; при смазывании погружением она больше, чем при струйном. Это можно, видимо, объяснить большим гидродинамическим давлением в зарождающихся усталостных трещинах при струйном смазывании, когда оно производится жидким маслом, а не в смеси с воздухом.

Различают выкрашивание начальное и прогрессирующее. Иногда в начальной стадии работы контактирующихся поверхностей наблюдается выкрашивание, которое затем прекращается, а образовавшиеся ямки заплывают металлом. Происходит своего рода самозалечивание. Такое выкрашивание называют начальным в отличие от прогрессирующего, которое не прекращается.

12.3.2 Повреждение в виде отслаивания

Другим видом повреждения является отслаивание, т.е. отшелушивание чешуек, имеющих иногда весьма заметные размеры. Отслаивание возникает в результате образования и развития продольной трещины на некоторой глубине с выходом ее на поверхность.

Отслаивание твердой корки металла наблюдается в деталях, которые азотированы, цементованы, цианированы или подвергнуты поверхностной закалке. Касательные напряжения на стыке твердой корки с сердцевиной приводят к разрушению ее тем быстрее, чем больше касательные напряжения внутри корки. Это объясняется определенным соотношением сопротивления усталости сердцевины и упрочненного слоя. Увеличивая его толщину, часто удается ликвидировать отслаивание. На разрушения, происходящие под поверхностью, помимо контактных напряжений, влияют остаточные напряжения от термической или термохимической обработки и напряжения от общей деформации детали.

Кроме того, причиной отслаивания может быть значительное пластическое деформирование не упрочненной поверхности детали под действием контактной нагрузки. При качении без смазочного материала или с пластичным смазочным материалом возникающие на поверхности усталостные трещины залечиваются (слипаются) при пластической деформации, а на глубине, в связи с неоднородностью структуры, появляются опасные остаточные напряжения.

Отслаиванию могут способствовать и дефекты металла в виде неметаллических включений, наличия свободного цементита и др.

Введение поверхностно-активных веществ в смазочный материал повышает нагрузочную способность пар трения, снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания, уменьшает предел выносливости сталей.

Пластмассовые детали при контактных нагрузках могут подвергаться изнашиванию и контактной усталости. При умеренном выделении теплоты наблюдается мелкое выкрашивание материала в зависимости от вида смазочного материала или отслаивание. Контактная прочность образцов из пластмасс уменьшается, если они ранее находились в контакте со смазочным материалом. Дело в том, что полимеры при соприкосновении со смазочным материалом набухают. Наличие смазочных материалов приводит к ослаблению межмолекулярных связей полимеров, что вызывает снижение их прочностных свойств.

12.4 Связь сопротивления усталости деталей с трением и изнашиванием

Многие детали, которые должны удовлетворять условиям общей прочности при переменных напряжениях, подвергаются в эксплуатации воздействию сил трения. Поскольку усталостное разрушение деталей начинается с поверхности или с приповерхностного слоя, то изменение геометрии, химического состава, структуры, системы собственных напряжений в поверхностях трения по сравнению с исходным состоянием не может не сказаться на сопротивлении усталости деталей.

Очевидно уменьшение шероховатости и упрочнение поверхности в процессе приработки повышает сопротивление усталости деталей. Если шероховатость по-

верхности во время приработки ухудшается, поверхностный слой разупрочняется, в нем появляются остаточные растягивающие напряжения или убывают по абсолютной величине исходные напряжения сжатия, то сопротивление усталости деталей уменьшается.

Следы глубинного вырывания поверхностей терния служат очагами разрушения как концентраторы и, по-видимому, как места надрывов материала. Налипший материал тоже является концентратором. Долговечность, измеряемая числом циклов до разрушения, может быть в десятки раз ниже долговечности образцов с неповреждёнными схватываниями поверхностями.

Упрочнение поверхности и остаточные напряжения сжатия повышают предел выносливости. При периодическом деформировании поверхностного слоя в поверхностно-активном смазочном материале полученный наклеп сохраняется дольше. Одновременное воздействие трения качения и кругового изгиба приводит к тому, что с ростом числа циклов контактного нагружения и увеличением степени выкрашивания эффект упрочнения менее значим по сравнению с действием других факторов, и разрушение может наступить при напряжениях ниже предела выносливости. Более интенсивное изнашивание при фреттинг-коррозии на части поверхности контакта деталей может вызвать эксцентричность в приложении осевой нагрузки. Неравномерная осадка многоопорного вала вследствие различного износа вкладышей и шеек по отдельным подшипникам вызывает дополнительные напряжения в вале и перегружает отдельные опоры. Увеличение зазоров в сочленениях механизмов с возвратно-поступательным или качательным движением повышает коэффициент динамичности нагрузки.

Повреждениях шеек валов и осей в результате расплавления цветных подшипниковых сплавов вкладышей подшипников при их перегреве. Если расплавленный металл смачивает сталь, то он проникает в раскрытые под действием растягивающих напряжений микротрещины поверхности стальной детали и, адсорбируясь на стенках трещины, уменьшает поверхностную энергию основного материала и тем самым снижает его прочность.

13 Влияние различных факторов на интенсивность изнашивания

13.1 Влияние нормальной нагрузки

Нормальная нагрузка (номинальное давление) нелинейно влияет на износ для неприработанных поверхностей и линейно для приработанных поверхностей.

13.2 Влияние топографии поверхности

Влияние микрогеометрии поверхности на интенсивность изнашивания значительно. Поскольку комплексный критерий шероховатости

$$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{1/v}}$$

где r – приведенный радиус неровностей;

b, v - параметры опорной кривой, меняется в пределах $10^{-3} < \Delta < 1$;

Δ – показатель степени при Δ лежит в пределах 0,8-4, т.е. изменение микрогеометрии может менять интенсивность изнашивания в несколько порядков.

Отношение параметров волнистости обычно лежит в пределах $10^{-3} > \frac{H_B}{R_B} > 10^{-6}$, а показатель степени при $\frac{H_B}{R_B}$, где H_B – высота неровности; R_B – радиус неровности, лежит в пределах 0,16-0,8.

Поэтому с увеличением отношения $\frac{H_B}{R_B}$ интенсивность изнашивания уменьшается.

В случае изнашивания приработанных поверхностей исходная микрогеометрия трущихся поверхностей не влияет на интенсивность изнашивания.

13.3 Влияние механических свойств контактирующих поверхностей

С увеличением модуля упругости E (для материалов с одинаковыми прочностными свойствами) интенсивность изнашивания возрастает, причем весьма значительно.

С возрастанием разрушающего напряжения σ_0 и параметра фрикционной усталости t_y , а также с повышением твердости интенсивность изнашивания снижается.

Так как между модулем упругости E и прочностными характеристиками имеет связь, однозначную зависимость между модулем упругости и интенсивностью изнашивания или между величинами σ_0 и t_y и интенсивностью изнашивания экспериментально установить затруднительно.

13.4 Влияние фрикционных свойств поверхности

С уменьшением коэффициента трения интенсивность изнашивания уменьшается. Это объясняется тем, что при применении смазочного материала, сильно уменьшается износ. Однако это изменение также ведет к изменению узла трения, а она, в свою очередь, на свойства трущихся поверхностей.

Влияние силы молекулярного взаимодействия на интенсивность изнашивания приработанных поверхностей описывается сдвиговым сопротивлением, который тем меньше чем меньше интенсивность изнашивания.

13.5 Влияние скорости скольжения и температуры зоны трения

При абразивном изнашивании относительная скорость в зоне трения имеет незначительное влияние на интенсивность изнашивания диапазоне малых скоростей. Если при сухом трении относительная скорость превышает некоторое предельное

значение, то возникают лавинные процессы резания, царапания, приводящие к аварийному износу (заеданию).

При большой скорости движения, охлаждающей или смазывающей жидкости, загрязненной абразивными частицами, может возникнуть эрозионное изнашивание, значительно интенсифицирующее процесс. Если в ТС интенсивность процесса изнашивания ведущим процессом физического старения является адгезионное изнашивание, то относительная скорость перемещения в зоне контакта оказывает большое влияние на качественные и количественные характеристики схватывания. Протекают три основных процесса: схватывание I рода, схватывание II рода, окисление.

Схватывание I рода наблюдается у металлов обычно при скорости 0,0025-0,5 м/с и приводит к образованию на поверхности трения углублений, наростов, царапин при значительном изменении шероховатости. Толщина пластически деформированной подповерхностной зоны 100-150 мкм, ее микротвердость 4500 МПа. Температура зон трибологического контакта при схватывании I рода от 60 °С до 180 °С, коэффициент трения 0,6-1,1.

При относительной скорости 0,5-1 м/с износ в зонах трибологического контакта вызывается процессами окисления. При этом на поверхности образуются окисные пленки в результате химической реакции между кислородом воздуха и основным металлом контактирующих деталей сопряжений.

При скорости 1-5 м/с процессом разрушения зоны трибологического контакта является схватывание II рода, характеризующееся очень интенсивным изнашиванием металла. В результате этих процессов изнашивания поверхность становится очень шероховатой с отчетливыми следами течения и размазывания материала параллельно направлению относительного движения. Процесс схватывания сопровождается температурой около 400 °С и даже до 1000 °С-1100 °С. Такое термическое состояние сталей в зонах трения вызывает рекристаллизацию, отпуск и закалку металла ПС и образование вторичных структур. Микротвердость подповерхностных зон ПС 450-500 МПа.

При фреттинге скорость относительного смещения не оказывает существенного влияния на развитие усталостных трещин.

Высокие скорости скольжения (свыше 50 м/с) встречаются в авиации, ракетной технике, турбостроении. В большинстве случаев высокоскоростное трение характеризуется малой продолжительностью процесса взаимодействия трущихся тел (от 10^{-5} до 1 с, реже до 10-20 с).

В процессе высокоскоростного трения интенсивно выделяется тепло в зоне трения. Интенсивность тепловыделения q в единицу времени на единице номинальной площади контакта определяется по формуле

$$q = fv,$$

где f – коэффициент трения скольжения;

p_a – номинальное давление;

v – скорость скольжения.

Материалы контактирующих пар при высоких скоростях скольжения не успевают прогреться на всю глубину, и в теплопоглощении участвует тонкий поверхностный слой, толщина которого δ определяется так:

$$\delta = 1,94\sqrt{at},$$

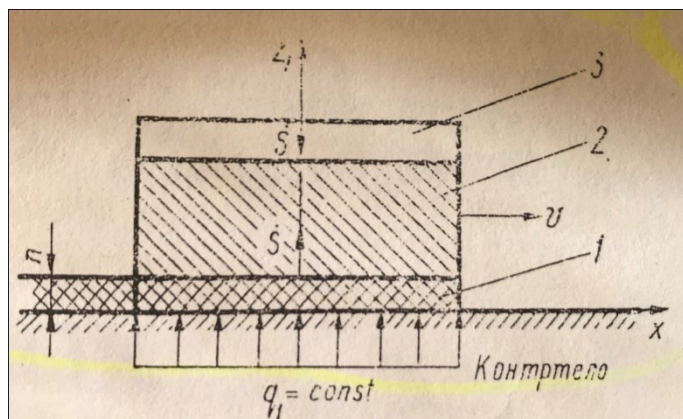
где a – температуропроводность;
 t – продолжительность контакта.

Интенсивность теплового потока, малая глубина слоя, участвующего в теплопоглощении, ведут к тепловому удару с большим температурным градиентом в зоне контакта. Высокая температура на поверхности трения может вызвать оплавление поверхностного слоя одного из контактирующих тел. На рисунке 13.1 показана модель оплавления твердого тела при высокоскоростном трении.

Время начала оплавления определяют из выражения

$$t_{\text{пл}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\lambda^2 (v_{\text{пл}} - v_0)^2}{a q_1},$$

где λ – теплопроводность;
 v_0 – начальная температура тела;
 a – коэффициент;
 q_1 – тепловой поток.



1 – расплавленный слой; 2 – область прогрева; 3 – область с начальной температурой

Рисунок 13.1 – Модель оплавления твердого тела в области контакта при высокоскоростном трении

Наличие оплавленного слоя в зоне трения при высоких скоростях скольжения ведет к значительному уменьшению коэффициента трения и может явиться причиной возникновения гидродинамического трения.

Этим объясняется, что применение смазочного материала сильно снижает f_m и тем самым значительно уменьшает износ. Изменение коэффициента трения влечет за собой изменение температуры узла трения, а температура, в свою очередь, влияет на механические свойства трущихся поверхностей.

Влияние силы молекулярного взаимодействия на интенсивность изнашивания приработанных поверхностей учитывается сдвиговым сопротивлением τ_0 . Чем меньше τ_0 , тем меньше интенсивность изнашивания. Поэтому введение смазочного материала снижает интенсивность изнашивания.

От скорости скольжения зависят мощность тепловыделения и температура узла трения, последняя влияет на механические и фрикционные свойства изнашивающихся поверхностей, ведет к структурным изменениям в поверхностных слоях.

Модуль упругости материалов E с повышением температуры незначительно снижается, разрушающее же напряжение σ_0 уменьшается более существенно. Влияние температуры на f_m и t_y неоднозначно, зависимость интенсивности изнашивания от температурно-скоростного фактора, определяющего тепловыделение в контакте, имеет так называемые критические точки (рисунок 5.2).

При достижении на контакте определенных температур происходят качественные изменения механических и фрикционных свойств поверхностных слоев материалов, при которых интенсивность изнашивания может скачком меняться на несколько порядков.

При относительном скольжении двух тел в тонком поверхностном слое образуется тепло, которое может привести к местному размягчению и расплавления материала. Тепло распространяется от пятен контакта в глубь обоих контактирующих тел, причем тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплоотвода.

Интенсивность теплового потока зависит от работы силы трения и величины площади, на которой осуществляется эта работа.

Если теплопроводность первого и второго контактирующих тел λ_1 и λ_2 , то общее количество тепла Q , образующегося в зоне трения, распределяется между телами, т. е. $Q = Q_1 + Q_2$. Соотношение тепловых потоков можно представить в виде

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\alpha_\lambda}{\sqrt{\alpha_a}},$$

где $\alpha_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ – коэффициент относительной теплопроводности тел;

α_a – коэффициент, характеризующий теплоинерционные свойства первого тела относительно второго.

Зависимость получена для двух соприкасающихся ограниченных тел, имеющих тепловую изоляцию с боковых сторон. В действительности происходит теплоотдача в окружающую среду.

С учетом теплоотдачи при линейном тепловом потоке коэффициент распределения теплового потока, показывающий, какая часть теплового потока направляется на одно из контактирующих тел (на второе тело), запишется так:

$$\alpha = 1 - \frac{\sqrt{\pi\sigma'}}{\sqrt{\pi\sigma'} + \sqrt{\rho cv}},$$

где σ' – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;

ρ – плотность материала второго тела;

c – удельная теплоемкость второго тела;

v – скорость скольжения.

На условие теплоотдачи решающее значение оказывает коэффициент взаимного перекрытия, представляющий собой отношение площадей трения контактирующей пары.

При схватывании *I* рода температура изнашивания существенно влияет на интервал процесса: чем выше температура, тем уже интервал.

Адгезионное изнашивание схватыванием *II* рода зависит в основном от температуры трибологических деталей. Максимальная температура поверхности трения ϑ_{max} равна сумме объемной температуры ϑ_0 , среднеповерхностной ϑ^* и температурной вспышки, вызванных трением.

При схватывании *II* рода увеличение температуры зон трения приводит к расширению границ существования этого процесса. С увеличением температуры изменяется химический состав материала ПС и уменьшается концентрация легирующих присадок из-за интенсификации диффузии из подповерхностных зон на поверхность металла, где легирующие присадки окисляются.

Изнашивание при схватывании *I* рода имеет место при температуре 100-180 °С, изнашивание вследствие окисления – при температуре 180-560 °С и вследствие схватывания *II* рода – при температуре 560-1200 °С.

13.6 Влияние смазывания зоны трибологического контакта на интенсивность изнашивания

Смазываемые зоны трения изнашиваются значительно менее интенсивно, чем зоны при сухом трении. Смазываемые эластогидродинамические и гидродинамические узлы трения обычно не подвержены абразивному изнашиванию. С увеличением вязкости смазочного материала вообще уменьшается интенсивность изнашивания трибологических деталей.

При адгезионном изнашивании смазка существенно снижает интенсивность изнашивания деталей машин, поскольку адсорбируемые ПАВ пластифицируют материалы ПС. Смазывание зон трения значительно ограничивает их изнашивание по сравнению с изнашиванием при сухом трении, поскольку смазочный материал улучшает передачу нагрузок, снижает сопротивление трения и количество выделя-

ющей теплоты, отводит продукты износа (например, окислы металлов), отводит теплоту.

Смазка резко снижает интенсивность изнашивания. Достаточно ввести в зону контакта деталей небольшое количество смазочного материала (толщина смазочного слоя 0,1 мкм), как сила трения может снизиться в 10 раз, а износ поверхностей трения до 1000 раз.

При работе машин количество масла уменьшается; оно убывает вследствие утечек через неплотности, некоторая его доля переходит в шлам, часть теряется вместе с удаляемой водой, испаряется, а в двигателях внутреннего сгорания теряется в результате угара. Потери масла в системе периодически восполняют доливом.

Чистота смазочных материалов является одним из важнейших условий долговечности машин, поэтому при их транспортировании, хранении, выдаче и в процессе заправки должны быть приняты меры против загрязнения.

Масло в системе вследствие старения теряет смазочные свойства и требуется, периодическая замена его свежим. В системах большой вместимости рекомендуется периодически производить анализ работающего масла.

Сроки смены масла зависят от условий работы машины и могут быть различными для одной и той же машины. Для любой машины периодичность подачи смазочного материала в смазочные точки и периодичность смены масла в картере должны назначаться исходя из условий наиболее неблагоприятного длительного режима работы малоизношенной машины. Для составления карты смазывания используют инструкции и схемы заводов-изготовителей, результаты исследований и опыт эксплуатации.

В настоящее время уровень технического совершенства машин во многом определяется степенью организации смазывания узлов трения. Пока нет четких рекомендаций по дозировке и длительности подачи смазочных материалов в конкретные узлы трения машины.

13.7 Влияние агрессивной среды и вакуума на интенсивность изнашивания

В агрессивных средах разрушение поверхности тела происходит под действием двух одновременно протекающих явлений: коррозии и механического изнашивания. Химическое взаимодействие происходит при контакте материалов с сухими газами или с неэлектропроводными агрессивными жидкостями; электрохимическая коррозия – при контакте металлов с электролитами. При этом наблюдаются два процесса: анодный (непосредственный переход атомов металла в раствор в виде ионов) и катодный (ассимиляция избыточных электронов атомами или ионами раствора). В зоне трения возникает электрический ток. Поведение поверхностей при трении в агрессивных средах можно характеризовать изменением электродных потенциалов.

На обнажающихся при трении поверхностях образуются пленки, обладающие иными свойствами, чем пленки, образующиеся при трении вне агрессивной среды. Если образующаяся пленка легко удаляется, может возникнуть схватывание, если пленка носит защитный характер, интенсивность изнашивания снижается.

Материалы, которые применяются для пар трения, работающих в агрессивных средах, должны обладать высокой коррозионной стойкостью в сочетании с хорошими антифрикционными свойствами и износостойкостью, обеспечивающей заданный ресурс, не должны проявлять схватывания и заедания при работе. Скорость изнашивания материалов при трении в коррозионно-активных средах обуславливается скоростями образования поверхностных слоев и их разрушения в процессе трения, а также скоростью изнашивания в результате механического воздействия.

Температуры от до -150°C называют низкими, от -150°C до $272,85^{\circ}\text{C}$ – криогенными, а ниже $-272,85^{\circ}\text{C}$ – сверхнизкими.

При низких температурах рекомендуется использовать металлы с гранецентрированной кубической решеткой (Al, Ni, Pb, Cu, Ag) или гексагональной плотноупакованной решеткой (Ti, Zn, Mg, Co). До -45°C могут работать все стали с мелкозернистой структурой; до -100°C – закаленные и отпущенные низколегированные ферритные стали с мелкозернистой мартенситной структурой; до -200°C – нержавеющие стали с аустенитной структурой; до -240°C – никелевые стали со стареющим мартенситом. При низких температурах применяются также медные, никелевые, магниевые, титановые и алюминиевые сплавы. Для изготовления пар трения, работающих в условиях низких температур, обычно используют нержавеющую сталь и углеграфит.

В узлах трения при низких температурах используют специальные жидкие смазочные материалы – кремнийорганическую смазку номер 3 (до -100°C), углеводородную смазку ЦИАТИМ-205 (до -50°C) и консистентную смазку ЦИАТИМ-221 (до -100°C). При температурах от -45°C до -185°C хорошо зарекомендовали себя смазочные материалы на основе жидких фтористых полиэфиров.

При трении в условиях криогенных температур (в жидком азоте и водороде) на поверхностях трения окисные пленки быстро удаляются, вследствие чего поверхности металлов приобретают склонность к схватыванию и интенсивному изнашиванию. В среде жидкого кислорода трение металлов сопровождается сильной коррозией поверхности. Другая особенность трения в криогенных жидкостях – их низкая вязкость, которая может явиться причиной возникновения задиров, и значительное тепловыделение. Возможно также образование газообразной фазы, что приводит к кавитации и разрушению поверхностей трения.

Условия работы узлов трения в вакууме характеризуются малой скоростью восстановления окисных и адсорбционных пленок на поверхностях трения, испарением материалов, возможностью их деструкции, изменением фазового состояния и механических свойств материалов, а также ухудшением теплоотвода от узла трения (отсутствует конвективный теплоотвод). Критерием для разграничения степени вакуума служит отношение

$$\lambda/d,$$

где λ – средняя длина свободного пути молекулы газа между двумя столкновениями с другими молекулами;

d – линейный размер, существенный для рассматриваемого процесса.

В зависимости от λ/d различают четыре степени вакуума, которым соответствуют определенные области давлений:

	Низкая	Средняя	Высокая	Сверхвысокая
Степень вакуума	$\lambda/d \ll 1$	$\lambda/d \approx 1$	$\lambda/d > 1$	$\lambda/d \gg 1$
Область давлений, Па.	>100	$100-10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$<10^{-5}$

Различают также «масляный» (при наличии в составе остаточных газов углеводородных соединений) и «безмасляный» вакуум (при отсутствии этих соединений).

Требования к узлам трения, работающим в вакууме, подразделяют на следующие виды: требования к материалам, к конструкции и вакуумной гигиене.

а) требования к трущимся материалам, работающим в вакууме: они должны обладать минимальным газовыделением и пористостью, низкой скоростью испарения, термостойкостью и коррозионной стойкостью.

Материалы и изделия в вакууме выделяют газы, находящиеся на поверхности их стенок и внутри. Количество газа, выделяющееся с единицы поверхности или массы тела в единицу времени, называют *скоростью удельного газовыделения*.

Общий поток газовыделения Q с поверхности узла трения равен

$$Q = qA,$$

где q – скорость удельного газовыделения;

A – величина поверхности, обращенной в вакуум.

Если пара трения изготовлена из разных материалов, то общий поток газовыделения узла будет

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 и Q_2 – потоки газовыделения с поверхности каждой детали.

Жидкие и консистентные смазочные материалы в вакууме имеют очень высокую скорость газовыделения (испарения) и потому непригодны для использования в вакууме.

К числу твердых смазочных материалов, применяемых в вакууме, относят фторопласт (ПТФЭ), графит, дисульфид молибдена MoS_2 , дисульфид вольфрама WS_2 и некоторые другие (WS_{e2} , NBS_{e2}).

При трении в условиях вакуума наблюдается повышенное газовыделение. В начальный период трения происходит постепенное изнашивание защитных окисных пленок на поверхностях трения и газовыделение относительно невелико, также невелики в этот период значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания. После износа и разрушения защитных пленок на поверхностях трения газовыделение скачкообразно возрастает, также увеличивается коэффициент трения и интен-

сивность изнашивания. Затем процесс газовыделения и изнашивания несколько снижается и стабилизируется.

б) требования к конструкции узла трения, работающего в вакууме:

- легкость монтажа и демонтажа узла, а также доступность к отдельным деталям для их очистки от загрязнений;
- отсутствие труднооткачиваемых «карманов», соединенных с основным вакуумным объемом каналами малой проходимости;
- высокая надежность в работе;
- состав газов в общем потоке газовыделения должен удовлетворять требованиям к составу остаточных газов рабочего объема вакуумной установки.

Требования вакуумной гигиены:

- помещения, в которых производится изготовление и сборка узлов трения, не должны содержать в воздухе взвешенных частиц (пыли, копоти и др.), а также паров масел, кислот, щелочей и других химических веществ;
- все детали перед сборкой необходимо тщательно очистить от всех видов загрязнений (стружки, краски, масел, окисных пленок и др.);
- обезжирить бензином и высушить в сушильном шкафу при 80°C - 100°C ;
- сборку деталей следует производить в перчатках из неворсистых материалов;
- время от момента окончания сборки до монтажа должно быть минимальным.

Скольжение в вакууме без смазки характеризуется высоким коэффициентом трения, сопровождается схватыванием поверхностей, повышенным износом и, как правило, заклиниванием узла трения.

При трении одноименных пар металлов в вакууме коэффициент трения уменьшается с увеличением твердости.

Эффективность и долговечность работы узлов трения в вакууме с твердым смазочным материалом может быть обеспечена применением ротапринтного метода смазки, в соответствии с которым смазочный материал наносится на трущиеся поверхности вала и втулки за счет переноса его с намазывающих вставок. Намазывающие вставки могут свободно перемещаться радиально под действием центробежной силы в пазах вала, совпадающих с окнами во внутренней втулке, закрепленной на валу. Намазывающие вставки под действием центробежной силы прижимаются к поверхности втулки и смазывают ее.

Для нормальной работы таких подшипников без смазки сепараторы их изготавливают из самосмазывающихся материалов. Применяют твердые смазочные материалы дисульфид молибдена, тонкие пленки диселенидов тугоплавких металлов (WS_{e2} , NBS_{e2} , MoS_{e2}).

13.8 Влияние условий эксплуатации и режима работы на интенсивность изнашивания

Использование машин по назначению в надлежащих условиях, и правильная загрузка их имеют важное значение для долговечности подвижных деталей. Непредусмотренные большие силовые воздействия интенсифицируют изнашивание деталей.

Работа машины характеризуется нагрузочным, скоростным и тепловым режимами. Одна и та же производительность машины может быть достигнута при различных сочетаниях параметров нагрузочного и скоростного режимов.

Длительные установившиеся режимы работы машины при нагрузках ниже номинальных в некоторых случаях повышают скорость изнашивания.

В двигателях внутреннего сгорания повышение нагрузки сверх оптимальной ведет к сокращению сроков их службы. Пусковой период машины связан с повышенной интенсивностью изнашивания, которая зависит от длительности простоя машины перед пуском, от температуры деталей и свойств смазочного материала. Пусковым периодом следует считать промежуток времени от момента пуска до момента стабилизации теплового состояния машины.

Значительный износ при пуске двигателя обусловлен рядом причин. После остановки двигателя нагретое масло быстро стекает с горячих стенок цилиндров и остается в подшипниках в незначительном количестве. В момент страгивания поршня силы трения тем больше, чем больше перерыв между остановкой и последующим пуском.

Повышенное изнашивание деталей ходовой части транспортных машин происходит и в период их остановки. При тормозном моменте колеса, равном или превышающем момент от сил сцепления колеса с полотном дороги, происходит переход от качения к скольжению (юз). Юз приводит к местной выработке колес по кругу катания и уменьшает срок службы шин из-за истирания протектора.

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

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

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, но им можно руководствоваться лишь тогда, когда изменение того или иного показателя износа или совокупности их заметно влияет на экономичность работы машины.

13.9 Сроки службы трущихся деталей и убытки от трения и изнашивания в машинах

Срок службы детали или узла определяется не только по предельным износам в соответствии с тем или иным критерием, но и другими факторами, такими, как усталость, контактная усталость, коррозия и др.

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

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

Большинство машин (85 %-90 %) выходит из строя по причине износа деталей. Расходы на ремонт машин, оборудования и транспортных средств составляют в нашей стране десятки млрд руб. в год. При развитии промышленности эта цифра естественно увеличивается. 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.

Трудоемкость ремонта и технического обслуживания многих строительных и дорожных машин за срок их службы примерно в 15 раз превышает трудоемкость изготовления новых. Создание машин, не требующих капитальных ремонтов за весь срок их службы, и значительное сокращение текущих ремонтов по своей технико-экономической эффективности равноценны удвоению мощности машиностроительных заводов и увеличению выпуска металлов на многие миллионы тонн в год.

Простои автомобилей из-за технических неисправностей в некоторых автомобильных хозяйствах достигают 30 %-40 % календарного времени.

Причинами малого ресурса двигателей после ремонта являются:

- низкое качество обработки трущихся 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, 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.

14 Приработка и равновесная шероховатость

14.1 Основные процессы, протекающие при приработке

Детали после сборки сопрягаются по выступам неровностей поверхностей, и площадь их фактического контакта в начальный период трения мала, поэтому при нагружении пары трения действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация; неровности поверхности частично сминаются и частично разрушаются как по выступам, так и по впадинам. Срабатывание микронеровностей, сглаживание макронеровностей и волнистости поверхностей сопровождается увеличением несущей поверхности, интенсивность изнашивания снижается. Вместе с тем «пропахивание» поверхностей взаимно внедрившимися объемами и продуктами изнашивания в направлении относительной скорости поверхностей создает новые неровности, ориентированные вдоль направления движения и не совпадающие с направлениями обработочных рисков. По истечении определенного времени при неизменных условиях работы создается стабильная шероховатость поверхностей трения. Она будет больше или меньше начальной шероховатости: более грубые поверхности в процессе приработки выглаживаются, а гладкие становятся более грубыми. Каждая из сопряженных поверхностей к концу приработки приобретает свойственную ей шероховатость в данных условиях трения.

Микротвердость поверхностей трения к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния. За время приработки происходит передоформирование поверхности и изменение ее физико-химических свойств.

Очевидно, уменьшение шероховатости и упрочение поверхности в процессе приработки повышает сопротивление усталости деталей. Если шероховатость поверхности со временем приработки ухудшается, поверхностный слой разупрочняется, в нем появляются остаточные напряжения растяжения или убывают по абсолютной величине исходные напряжения сжатия, то сопротивление усталости деталей уменьшается. Влияние износа на прочность при повторно-переменных нагрузках может, таким образом, быть как отрицательным, так положительным.

14.2 Изменение микрогеометрии при трении

При трении скольжения, независимо от исходной шероховатости рабочих поверхностей тел, к концу приработки устанавливается для каждой из поверхностей пары определенная, свойственная данному сочетанию материалов и условиям трения шероховатость, сохраняющая стабильность при постоянном режиме трения. Независимо от вида трения в процессе приработки исходная шероховатость переходит в эксплуатационную, при которой работают поверхности.

Все пары трения для перехода в установившуюся стадию изнашивания требуют приработки. Продолжительность ее тем короче и объем изношенного металла тем меньше, чем исходная шероховатость ближе шероховатости после приработки.

Поскольку к установившейся стадии изнашивания одинаковые пары приходят с соответственно одинаковыми шероховатостями поверхностей трения, то при прочих равных условиях скорость установившегося изнашивания должна быть одна и

та же. Влияние исходной шероховатости поверхности на интенсивность изнашивания ограничивается стадией приработки.

В связи с необходимостью удаления значительных неровностей в процессе приработки начальный износ возрастает, может потребоваться больше времени на приработку, не исключается образование крупных частиц износа, которые могут вызывать задиры. Слишком гладкие поверхности меньше адсорбируют смазочный материал. С другой стороны, из-за большей фактической площади контакта скорость изнашивания невелика и может оказаться недостаточной для такого при срабатывания сопряженных поверхностей, которое необходимо для предупреждения опасной концентрации нагрузки. В результате иногда наступает заедание даже после длительной работы.

Для оценки эксплуатационных качеств важным фактором является направление следов механической обработки. Различные ее виды, позволяя получить одинаковую высоту микронеровностей, сообщают им не только различную конфигурацию, но и различное расположение на поверхности. Казалось бы, что с точки зрения прирабатываемости наиболее рациональным является направление штрихов, параллельное относительной скорости поверхностей. Однако это не может служить правилом. Наиболее выгодное расположение обработочных рисков на сопрягаемых поверхностях с учетом направления относительной скорости зависит от давления, режима смазывания, трущихся материалов и величин параметров шероховатости. При трении без СМ и больших давлениях штрихи на обеих поверхностях, расположенных перпендикулярно движению, способствуют заеданию.

Предупредить заедание можно взаимно перпендикулярным расположением штрихов на сопряженных поверхностях. Такое же расположение штрихов рекомендуется при трении с граничной смазкой поверхностей малой шероховатости. При трении без СМ и небольших давлениях или при граничной смазке и относительно большой шероховатости целесообразна параллельность обработочных штрихов в направлении движения.

Период приработки у твердых сталей невелик, а эксплуатационная шероховатость поверхностей, определяющая их усталостную долговечность, зависит от условий работы материала в контакте и исходной шероховатости. Для повышения нагрузочной способности необходимо при прочих равных условиях их рабочим поверхностям придать малую шероховатость при изготовлении.

14.3 Гипотезы образования микрорельефа

Как новая, так и отремонтированная машина перед вводом в эксплуатацию должны пройти обкатку. Назначение обкатки – приработка в едином комплексе всех пар трения, входящих в состав машины.

Погрешности сопрягаемых поверхностей деталей и неточности во взаимном расположении рабочих поверхностей в сопряжениях обуславливают весьма взаимного контакта деталей. Приложение эксплуатационных нагрузок к деталям при таком контактировании их поверхностей привело бы при работе машины к быстрому перегреву во многих парах и их заеданию. Обкатка машины или механизма готовит

детали к восприятию эксплуатационных нагрузок при соответствующих скоростных режимах.

Во время обкатки должны быть реализованы два процесса. Первый процесс макрогеометрическая приработка, второй – микрогеометрическая. Микрогеометрическая приработка проходит сравнительно быстро. У двигателей на это требуется 1-2 часа, как полная приработка двигателя длится 35-40 часов, а полная обкатка тракторных двигателей по некоторым режимам 50-60 часов. Значительные технологические дефекты изготовления деталей и сборки машины и конструктивные недочеты в обеспечении хорошего взаимного прилегания поверхностей не могут быть устранены при обкатке и даже при работе машины в течение межремонтного периода.

14.4 Факторы, влияющие на эффективность приработки

Приработка протекает на отдельных участках в режимах трения при граничной и полужидкостной смазке. При этом происходит повышенное накопление продуктов изнашивания. Возможно отделение крупных частиц при выкрашивании и срабатывании наиболее выступающих неровностей поверхности.

После приработки масло в картерах и остальных элементах системы загрязняется и его следует считать отработанным.

Критерии оценки окончания приработки:

- 1) переход на прямолинейный участок кривой изнашивания;
- 2) минимум мощности при холостом ходе машины;
- 3) стабилизация момента трения и температуры;
- 4) наибольшая эффективная мощность двигателя при заданной скорости;
- 5) достижение заданной степени прилегания контактирующих поверхностей.

Длительность обкатки определяется начальной шероховатостью поверхностей трения, точностью обработки деталей и их сборки, материалом деталей наиболее напряженных пар трения и зависит от эксплуатационных режимов работы машины, от режима обкатки и от свойств смазочного материала.

Под режимом обкатки понимают последовательность длительность нагружения машины при соответствующих скоростных режимах. Обкатку машины начинают с холостого хода на малых скоростях.

Режим горячей обкатки под нагрузкой относят к испытаниям. В результате обкатки могут произойти некоторые изменения физико-механических свойств материала приповерхностного слоя, затронутого приработкой.

Оптимальный вариант режима обкатки машины должен удовлетворять требованиям наименьшего первичного износа трущихся частей, минимальных затрат времени и средств.

Режим обкатки нельзя рассматривать изолированно от применяемых для приработки масел и топлив. Свойства смазочного материала при обкатке, имеют существенное значение.

Для сокращения времени обкатки применяют присадки к маслам, позволяющие форсировать режим. Присадками могут служить поверхностно-активные вещества, органические соединения серы, хлора, фосфора.

Действие присадок, содержащих серу, хлор и фосфор, основано на образовании легко срабатываемых пленок, которые получаются в результате химического взаимодействия активного элемента с металлом детали. Потери масла в системе периодически восполняют доливом.

14.5 Расчет равновесной шероховатости

Для шероховатости, сформировавшейся в процессе приработки, ввели понятие «равновесная шероховатость» и предложили безразмерный комплексный параметр Δ ее оценки. Для условия минимума коэффициента трения уравнение для определения параметра Δ имеет вид

$$\Delta = 16 \left(\frac{\tau_0}{\alpha_r} \right)^{5/4} \theta^{3/4} p_c^{-1/2},$$

где τ_0 – постоянная адгезионных свойств;
 α_r – коэффициент гистерезисных потерь;
 p_c – контурное давление;
 θ – постоянная физико-механических свойств.

$$\theta = \frac{1-\mu^2}{E},$$

где μ – коэффициент Пуассона;
 E – модуль Юнга.

В период стационарного изнашивания равновесная шероховатость воспроизводится на всем последующем процессе нормальной работы пары трения. Это позволило сделать вывод, что технология обработки поверхности трения не влияет на ее долговечность. Чем больше исходная шероховатость поверхности трения отличается от оптимальной, тем больше будет износ в период приработки, и меньше долговечность пары трения.

Величина макроотклонения при изнашивании будет постоянно уменьшаться за счет износа контактирующих участков. Волнистость поверхности трения в зависимости от условий изнашивания и ее исходного значения в процессе приработки будет изменяться аналогично шероховатости. Малые волны при больших нагрузках могут вызвать «пленочное голодание», схватывание и вырывы значительных объемов, т.е. их увеличение.

Процесс изменения макроотклонения, волнистости, шероховатости и физико-механических свойств поверхностей трения в процессе приработки будет взаимосвязанным.

Значение формируемой равновесной шероховатости будет зависеть от других параметров поверхности трения, в частности от макроотклонения, волнистости и физико-механических свойств.

В процессе эксплуатации происходит взаимосвязанное изменение параметров качества поверхностного слоя деталей машин и только технологическое обеспечение комплексного параметра позволяет в значительной мере повысить их долговечность.

15 Эффект безызносности

15.1 Сущность эффекта безызносности

При исследовании технического состояния шасси самолетов было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди в парах трения бронза-сталь при смазывании их спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1-2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала износ узла трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Медная пленка в паре сталь-бронза образуется в результате анодного растворения бронзы. При этом легирующие элементы цинк, олово, алюминий, железо уходят в смазочный материал и поверхность обогащается медью. После того как поверхность бронзы и стали покрывается медью, растворение бронзы прекращается и устанавливается режим избирательного переноса (ИП).

Основные факторы, определяющие износ:

- 1) пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению их микронеровностей;
- 2) окислительные процессы (при трении окислительные процессы происходят очень интенсивно). Окисные пленки, хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, хрупки, быстро разрушаются и образуются вновь;
- 3) внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхности и при многократном воздействии их разрушение;
- 4) адгезионное схватывание контактирующих поверхностей, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усилению изнашивания;
- 5) накопление в поверхностях трения деталей водорода, что ускоряет это изнашивание.

Однако с увеличением нагрузок в узлах трения, методы повышения износостойкости деталей путем увеличения их твердости перестали себя оправдывать. Фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

Имеются два типа узлов трения – открытые и закрытые. В открытых узлах трения работает твердый материал по твердому – это зубы животных. Закрытые узлы трения – суставы живых организмов. Подобные пары трения у живых организмов являются универсальными узлами, обладающими «безызносностью».

Основной закон термодинамики Клаузиуса предсказывает рост энтропии, т.е. беспорядка в замкнутой системе. Эволюционная теория Дарвина, наоборот, устанавливает, что в основе отбора лежит повышение степени организованности биоло-

гических систем. Биологическая эволюция стала рассматриваться с кибернетических позиций и понятий автоматического регулирования и обратной связи, что основную роль в указанном сближении следует отнести спонтанному формированию структур в открытых системах на молекулярном уровне. В открытых системах, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности.

Новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия:

- 1) система является термодинамически открытой, т.е. может обмениваться веществом m (или) энергией E со средой;
- 2) динамические уравнения системы нелинейные;
- 3) отклонения от равновесия превышают критическое значение;
- 4) микроскопические процессы происходят кооперативно (согласованно).

Во многих явлениях неживой природы явно отсутствуют какие-либо признаки самоорганизации, наблюдается распад системы и увеличение энтропии.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях. Узел трения в неживой природе может удовлетворять требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном случае – молекул.

Трение может сопровождаться эволюционными процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов меди, из которых формируется тонкая медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания.

Металлическую медную 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 плёнка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатость поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. Мягкий материал по мягкому материалу. Нагрузка распределяется равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади она незначительна. Это способствует продлению жизни узла трения.

15.2 Механизм образования сервовитной плёнки и её структура

В зависимости от вида смазочного материала, условий работы узла трения и конструкционных материалов, из которых изготовлены трущиеся детали, механизм формирования сербовитной пленки может быть различным.

1 Формирование сербовитной пленки в паре бронза-сталь при смазывании глицерином. Глицерин является модельной жидкостью, которая легче других реализует режим избирательного переноса (ИП) при трении пары бронза-сталь. В первый период работы пары происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уходят в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. После ухода атомов легирующих элементов с поверхности бронзы деформация ее при трении вызывает диффузионный поток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал. Таким образом, слой бронзы, который деформируется при трении, освобождается от легирующих элементов и становится в основном из меди. В нем образуется большое количество вакансий, часть из них нивелирует, образуя поры, которые заполняются молекулами глицерина.

Глицерин, как известно, является восстановителем окиси и закиси меди, поэтому поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Поскольку слой меди, образующийся на бронзовой поверхности, утончается вследствие его переноса на стальную поверхность, то происходит дальнейшее растворение бронзовой поверхности. Этот процесс происходит до тех пор, пока на обеих поверхностях, стальной и бронзовой, не образуется слой меди толщиной 1-2 мкм.

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

В процессе приработки в случае ограниченного объекта смазочного материала в нем могут образоваться мицеллы – частицы меди, окруженные плотным кольцом молекул смазочного материала. Мицеллы имеют заряд, что удерживает их в зазоре. Иногда, по каким-либо причинам, мицеллы выходят из зазора; тогда под действием электрического поля они попадают в узкие щели, например, между испытуемым образцом и подложкой или под головку болта, крепящего образец, и там образуют тонкую пленку меди.

Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса – процесса растворения металла. Вследствие образования сербовитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения может полностью прекратиться, наступит установившийся режим трения. Если по каким-либо причинам медная пленка разрушится, то вновь произойдет растворение бронзы, и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние.

Происходят и каталитические превращения. Поверхность меди при отсутствии окисной пленки может вызвать дегидроорганизацию спирта. В результате выделяет-

ся свободный водород, который активно участвует в процессе трения, восстанавливает окисные пленки на медном сплаве и стали, поддерживая процесс без окислительного трения. При температуре более 65 °С увеличивается выделение водорода, и режим ИП переходит в водородное изнашивание. Поверхность стального образца интенсивно насыщается водородом, растрескивается и в виде порошка переносится на поверхность бронзы.

2 Сервовитная пленка может образовываться в узле трения сталь-сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании ЦИАТИМ-201 с добавками порошка меди, бронзы или латуни, а также свинца в паре сталь-сталь поверхности деталей покрываются тонкой пленкой, состоящей из металла применяемых порошков. В процессе работы порошки частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления окисных пленок на их поверхности прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку. Такие пленки пластичных металлов пористы и содержат в порах смазочный материал. Коэффициент трения при высоких нагрузках снижается, а стальные поверхности не изнашиваются. При трении сдвиг поверхностей трения происходит внутри образующихся пленок по диффузионно-вакансионному механизму. При хорошо восстанавливающих свойствах смазочного материала можно для реализации ИП вводить закись или окись меди. Сервовитная пленка образуется в результате восстановления окислов меди в процессе трения.

3 В промышленности М.В. Голубом, а также Е.Н. Грискиным разработан ряд порошковых твердо спеченных материалов, работающих в режиме ИП. Шихта для твердо спеченного материала готовится из тонкодисперсных смесей порошков ВКЗ, ВК6, ВК8. В качестве связующего материала применяют сплавы, содержащие медь (главным образом медно-никелевые), которые обладают жидкотекучестью и обеспечивают высокую прочность порошкового материала. Порошковые материалы могут работать в режиме ИП при смазывании нефтью, нефтепродуктами и сточными водами. Сервовитная пленка образуется на поверхности твердых составляющих сплава в результате механического выдавливания мягкой составляющей и ее последующего растворения. Сплавы способны работать в одноименной паре (композиционный материал по композиционному материалу). Такое сочетание материалов работоспособно только благодаря образованию сервовитной пленки, которая обеспечивает смазывание твердых составляющих порошковой композиции. Эти составляющие без пленки меди не могут нести нагрузку, происходят задиры поверхностей.

4 Сервовитная пленка может образоваться при трении о сталь политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненного закисью меди при смазывании глицерином. Пленка образуется в результате восстановления закиси меди до чистой меди. При трении стальная поверхность покрывается сервовитной пленкой. Повышение нагрузочной способности пары трения в присутствии органических солей меди объясняется тем, что медь, выделяющаяся в коллоидном состоянии в результате разложения указанных солей, под действием сил трения и высоких локальных температур находится в неокисленном виде, она способна взаимодействовать с металлической поверхностью контртела и образовывать на ней тончайшую пластичную медную пленку.

5 Неожиданным было обнаружение сервовитной пленки меди на упорных подшипниках скольжения, применяемых в турбинах и турбокомпрессорах. Подшипник состоит из упорного стального гребня, неподвижно закрепленного на вращающемся валу, и корпуса, внутри которого размещены по окружности плавающие подушки (сегменты). До последнего времени сегменты изготавливали из бронзы БрОФ 8,0 0.50, на которые наплавляли баббитовый слой толщиной несколько миллиметров. Такая конструкция известна под названием подшипников Митчелл и применяется издавна в упорных подшипниках скольжения. Б.П. Кузовкин совместно с сотрудниками Института проблем материаловедения АН Украины предложили наносить на поверхность бронзового сегмента бронзофторопласт из частиц сферической формы и пропитки его суспензией фторопласта-4.

6 В последние годы В. О. Гречко под руководством А. С. Кужарова выявлен оригинальный механизм образования сервовитной пленки в паре трения стального волокна ПТФЭ, наполненного тонкой медной проволокой. В зарубежной практике широко применяют подшипники скольжения из ПТФЭ, наполненного бронзой. При работе таких подшипников в паре со стальным валом в ряде случаев образуется сервовитная пленка меди. Структура фрикционного контакта, обеспечивающего режим ИП при трении медно-фторопластового композита. Приведенная структура граничного слоя состоит из связанного с поверхностью кристаллической решетки стали, слоя сервовитной пленки меди и металлополимерного слоя (1-16 Нм), ориентированного в направлении трения. Закрепление металлополимерного слоя на поверхности сервовитной пленки осуществляется в результате комплексообразования.

Таким образом, высокие триботехнические свойства медно-фторопластовых композитов связаны с реализацией ИП при трении без смазочного материала вследствие образования координационных соединений с двухвалентной медью. Наличие смазочного материала в таких композициях улучшает триботехнические характеристики во всем диапазоне нагружения, особенно при легировании смазочных материалов комплексообразующими присадками.

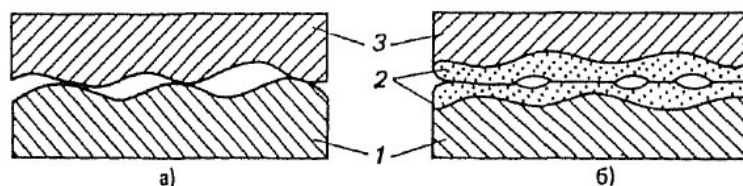
Физико-химические исследования структуры сервовитной пленки дали основание предположить, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплаву. Пленка не способна к наклёпу, имеет малые усилия сдвига, пориста, в верхней её части она не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении её частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую, т.е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения.

15.3 Физические основы эффекта безызносности

а) Осуществление контакта поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди.

При обычном трении как без смазочного материала, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01-0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно, к интенсификации изнашивания. При ИП он осуществляется через пластически деформируе-

мый мягкий тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации. Толщина сервоитной пленки достигает 1-2 мкм; это соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские. Имеющиеся методы определения площадей контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП (рисунок 15.1).



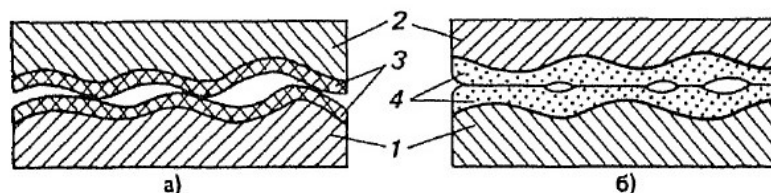
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – пленка меди

Рисунок 15.1 – Схема контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б)

б) Предотвращение процесса окисления металла на поверхности трения.

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками, которые, как известно, предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и не схватывание. Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, но при этом увеличивается и объем их разрушения.

В режиме ИП трение происходит без окисления поверхностей и поэтому не сопровождается образованием окисных пленок. Поверхности защищаются от окисления плотными слоями положительно заряженных адсорбированных поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трения и предотвращают поступление кислорода к сервоитной пленке. Отсутствие окисных пленок способствует образованию хемосорбционных процессов, что дает дополнительную защиту от изнашивания (рисунок 15.2).

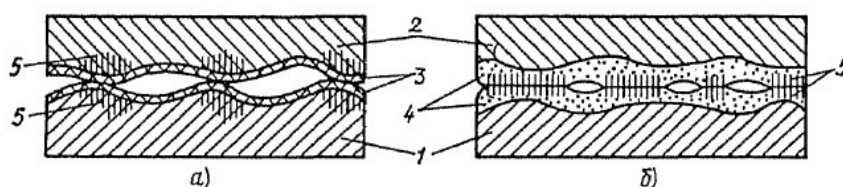


1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – сервоитные пленки

Рисунок 15.2 – Образования на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б)

в) Реализация эффекта Ребиндера.

Почти все смазочные материалы содержат поверхностно-активные вещества, что предопределяет возможность пластификации поверхностных слоев материала деталей в результате эффекта Ребиндера и снижения сил трения между ними. При обычном трении окисные пленки препятствуют проникновению среды (и вместе с ней ПАВ) к металлу, чем снижается эффект Ребиндера; в результате пластические деформации участков контакта охватывают более глубокие слои. При ИП окисные пленки отсутствуют, и действие эффекта Ребиндера реализуется в полной мере, в результате деформируется лишь серовитная пленка; подповерхностные слои металла не деформируются. Поскольку молекулы поверхностно-активных веществ находятся в порах серовитной пленки, не исключается скольжение и внутри пленки по принципу диффузионно-вакансионного механизма, но с малой затратой энергии. Все это значительно снижает трение и изнашивание (рисунок 15.3).



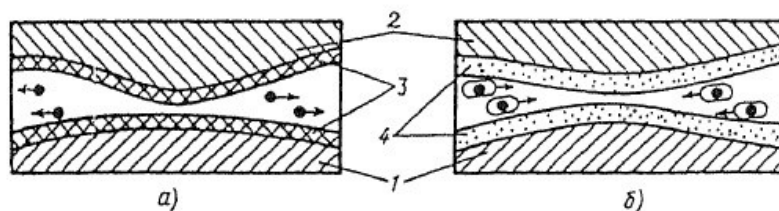
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – серовитные пленки

Рисунок 15.3 – Схема распространения деформаций в местах контакта при граничной смазке (а) и ИП (б)

г) Перенос частиц с одной поверхности трения на другую и удержание их в зоне контакта электрическим полем.

Продуктами изнашивания при трении с граничной смазкой являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда, свободно уносятся из зоны трения и, перемещаясь между контактирующими поверхностями, оказывают на них абразивное действие. Необходимо принимать меры для удаления продуктов изнашивания из смазочной системы.

При наличии на поверхностях трения серовитной пленки продукты изнашивания состоят из частиц меди; их поверхность пориста и очень активна, поэтому частицы покрываются адсорбционным слоем поверхностно-активных веществ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазорах. Кроме того, при ИП частицы износа могут переноситься с одной поверхности трения на другую и схватываться, не вызывая повреждения этих поверхностей (рисунок 15.4).

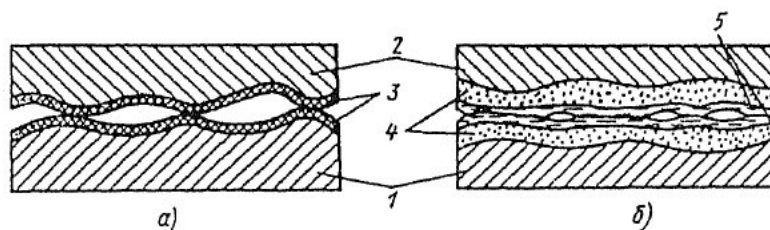


1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – серовитные пленки

Рисунок 15.4 – Схема движения частиц износа в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б)

д) Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности серовитной пленки.

Для повышения несущей способности смазочной пленки при трении в смазочный материал вводят специальные добавки, которые при трении полимеризуются и создают на поверхностях трения дополнительный защитный слой, предотвращающий их непосредственный контакт. Однако в условиях граничной смазки такая пленка образуется с трудом, так как окисная пленка, будучи инактивной, препятствует реакции поликонденсации и полимеризации. При ИП окисные пленки отсутствуют, а серовитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала; она предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает контактные давления (рисунок 15.5).



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

Рисунок 18.5 – Схема контакта деталей при наличии смазочного материала со специальными присадками при граничной смазке (а) и ИП (б)

15.4 Использование ЭБ в узлах трения

а) Тяжелонагруженные опоры качения.

Частыми причинами выхода из строя опор качения являются усталостное выкрашивание дорожек и тел качения, заклинивание и разрыв сепараторов, абразивное изнашивание. При эксплуатации опор качения указанные повреждения в ряде слу-

чаев могут быть устранены или уменьшены при использовании металлоплакирующих смазочных материалов.

Долговечность опор качения с линейным контактом тел качения и колец обратно пропорциональна нагрузке на более нагруженное тело в степени 3,3. Снижение этой нагрузки на 10 % повышает долговечность подшипника на 36 %. Создание между телом качения и кольцом подшипника металлической филенки увеличивает площадь контакта и тем самым снижает максимальную нагрузку на тело качения. Сервовитная пленка толщиной 0,5 мкм может увеличить даже при достаточно большой нагрузке площадь контакта в 1,5–2 раза, что отразится на долговечности подшипника.

При низких скоростях скольжения или при использовании твердых смазочных материалов потери в подшипниках качения снижаются. Возникает не только в результате деформации поверхностного слоя тел качения и колец, но и вследствие трения в сепараторе, вращения шариков. В качестве твердых смазочных материалов для подшипников качения применяют графит и молибденит. При использовании твердого смазочного материала в подшипниках качения трудно удержать его на поверхностях трения (рисунок 15.6). Применяют разные способы нанесения порошкообразных материалов на поверхности деталей подшипника: втирание (шаржирование), вбивание (галтовка в барабане) и др. Главный недостаток твердых пленочных покрытий – быстрое их изнашивание и, как следствие, небольшой срок службы подшипника. Для улучшения работы подшипника качения применяют сепараторы из самосмазывающихся материалов на основе порошковых материалов или полимеров.

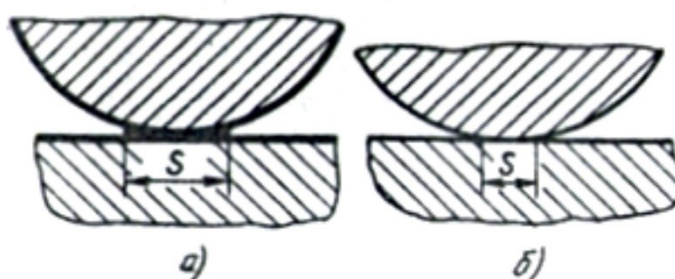
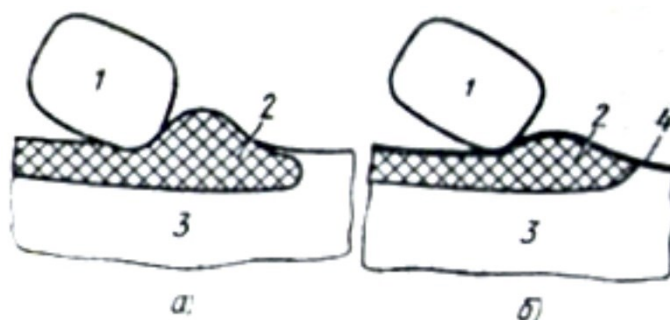


Рисунок 15.6 – Схемы контакта ролика с кольцом подшипника при наличии сервовитной пленки (а) и без нее (б)

б) ИП в условиях абразивного изнашивания.

Абразивные частицы размером менее 3 мкм не только не подавляют ИП в паре бронза-сталь в среде глицерина, но и инициируют этот процесс и ускоряют образование сервовитной пленки. При размере частиц более 3 мкм и большом их количестве сервовитная пленка изнашивается, но все же уменьшает силы трения и снижает интенсивность изнашивания. Формирование пленки происходит в зоне непосредственного контакта поверхностей трения при соответствующих смазочных материалах, поэтому если абразивная прослойка не будет разделять поверхности трения от непосредственного контакта, то сервовитная пленка будет образовываться, увеличивая износостойкость рабочих поверхностей деталей (рисунок 15.7).

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от многих факторов, в том числе от коэффициента трения между абразивом и изнашиваемой поверхностью. Если на поверхности металла в процессе трения образуется серовитная пленка даже малой толщины, то она уменьшит коэффициент трения между абразивом и металлом, что приведет к уменьшению пластической и упругой деформации основного металла. Серовитная пленка уменьшает зону пластической деформации основного металла, она способна к многократной пластической деформации без отделения частиц и легко подвергается деформации сдвига. Поэтому можно утверждать, что в зоне трения она способствует уменьшению абразивного изнашивания.



1 – абразив; 2 – зона пластически деформируемого металла; 3 – зона недеформируемого металла; 4 – серовитная пленка

Рисунок 15.7 – Схемы взаимодействия абразива с изнашиваемой поверхностью в режиме обычного трения (а) и при избирательном переносе (б)

В периодически смазываемых тяжелонагруженных шарнирных соединениях ИП имеет преимущества перед обычной граничной смазкой в условиях масляного «голодания». При однократном смазывании через некоторое время шарнир начинает испытывать недостаток смазочного материала – повышаются коэффициент трения, температура и интенсивность изнашивания. Возникает необходимость в новом смазывании. При реализации ИП время работы узла до повторного смазывания увеличивается в 3-4 раза. Серовитная пленка может длительно работать без дополнительного питания поверхностей смазочным материалом.

Увеличение промежутка времени между пополнениями узла трения смазочным материалом имеет большое значение для машин с многочисленными точками смазывания (экономия смазочных материалов и рабочей силы). Смазочно-регулирующие работы занимают 50 % времени на проведение технического обслуживания. Использование принципиально новых смазочных материалов для узлов трения, новых технологических процессов, новых материалов и конструкций узлов трения достигается только в тех случаях, когда проводились систематические исследования применительно к конкретным узлам трения машин данной отрасли.

Практическая часть

16 Лабораторная работа № 1. Изучение видов износа

Целью работы является ознакомление с видами изнашивания материалов, определение вида износа полученных образцов, их стадии и причины износа

16.1 Общие сведения

16.1.1 Основные сведения о трении, износе, видах изнашивания

До настоящего времени трение во многих его аспектах остается неясным. При трении одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные, химические и другие процессы. При трении может происходить упрочнение или разупрочнение металлов, изменение химического состава и другие явления. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью протекают явления, направленные на разрушение поверхности, или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих износ и трение.

Сегодня с трением связана одна из самых острых проблем современности – износ машин и механизмов. Расходы на восстановление машин в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Создание машин, не требующих капитальных ремонтов за весь срок их службы, и значительное сокращение текущих ремонтов по своей технико-экономической эффективности равноценны удвоению мощности машиностроительных заводов и увеличению выпуска металлов.

В отличие от высокого уровня постановки расчетов деталей и конструкций на прочность, жесткость и устойчивость, современное состояние теории трения и изнашивания не дает конструктору надежных методов расчета сопряженных пар на износ и большинства изнашивающихся деталей на долговечность на заранее предусматриваемый срок службы.

Однако теория и инженерная практика повышения износостойкости и надежности работы трущихся деталей располагают большим количеством важных качественных зависимостей, результатов экспериментальных исследований и наблюдений, использование которых позволяет существенно повысить сроки службы машин.

16.1.2 Виды изнашивания

16.1.2.1 Классификация видов изнашивания

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов разрушения и изменений механических и физико-химических свойств материала под воздействием внешних факторов (среда, температура, давление, вид трения, скорость относительного перемещения поверхностей и др.).

Классификация (таблица 16.1) носит условный характер, так как виды износа очень многообразны и тесно переплетаются по внешним признакам изнашивания.

Таблица 16.1 – Виды изнашивания

Признак классификации	Вид изнашивания
Механическое изнашивание	Абразивное; эрозионное (гидро-, электроэрозия, газовая, космическая); кавитационное; усталостное;
Молекулярно-механическое	Схватывание и заедание
Коррозионно-механическое изнашивание	Окислительное; фреттинг-коррозия; вследствие пластической деформации; вследствие диспергирования; в результате выкрашивания вновь образуемых структур; водородное

Вид износа можно установить по внешнему виду поверхности, составу и физико-механическим свойствам тонких поверхностных слоев.

Введем основные понятия, относящиеся к износу деталей и рабочих органов машин.

Изменение размеров и формы детали в результате изнашивания именуют износом. Его выражают в единицах длины, объема или массы.

Интенсивность изнашивания – отношение износа детали к пути трения или объему выполненной работы. При определении интенсивности изнашивания может оказаться более целесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов денной машины. Так, для автомобилей в качестве такого показателя может быть принято число километров пробега.

Скорость изнашивания – отношение износа детали ко времени, в течение которого происходило изнашивание, или к числу единичных актов изнашивания.

Износостойкость оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие выхода детали (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой ввиду снижения надежности механизма.

Характеристикой изнашивания является также коэффициент трения, которым называют отношение силы трения к нормальной составляющей внешней нагрузки, вызывающей перемещение трущихся деталей. Интенсивность изнашивания уменьшается с уменьшением коэффициента трения. Очевидно, что коэффициент трения характеризует и потери мощности машин на преодоление сил трения.

16.1.2.2 Характеристика видов изнашивания

а) механическое изнашивание

- абразивное изнашивание

Этот вид механического изнашивания материала образуется в результате режущего и царапающего действия твердых тел или частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами (рисунок 16.1) разрушение металла может происходить:

- 1) путем микрорезания;
- 2) многократной пластической деформации поверхности трения;
- 3) коррозионно-механического изнашивания.

На процесс абразивного изнашивания может влиять природа абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности.

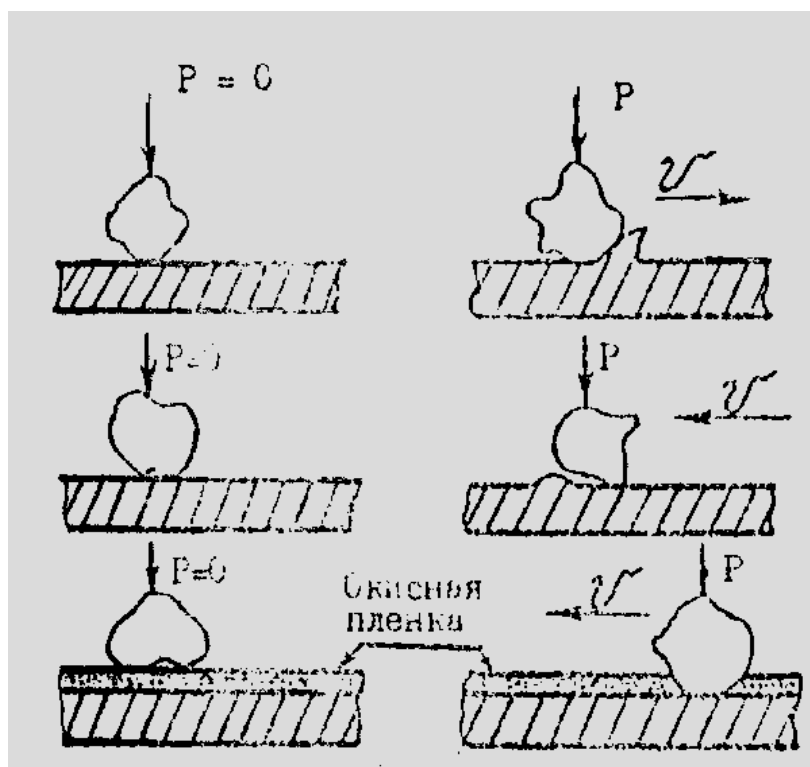


Рисунок 16.1 – Виды разрушений поверхности при абразивном износе

Абразивные частицы могут иметь различную форму и быть самым различным образом ориентированы относительно сопряженной поверхности. Способность абразивного зерна вдавливаясь в поверхность зависит не только от соотношения их твердостей, но и от геометрической формы зерна.

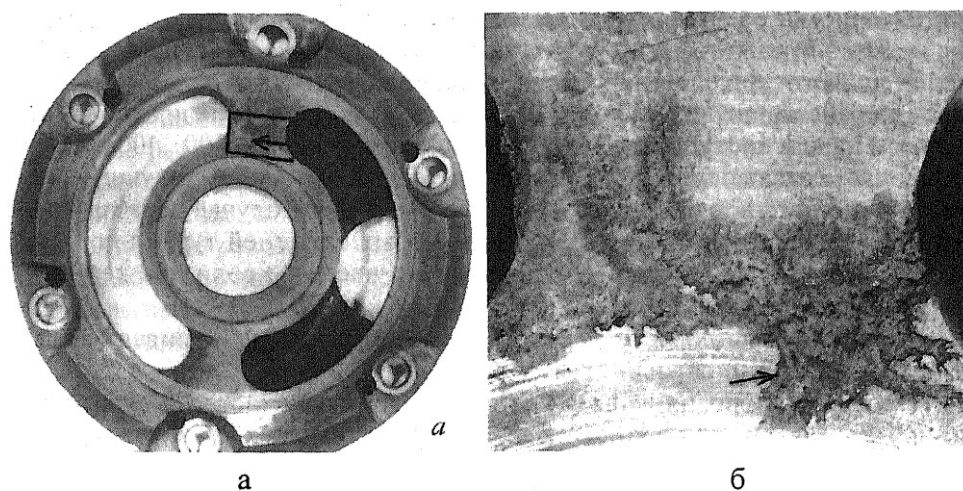
Гидро- и газоабразивное изнашивание возникает в случае воздействия потока газа или жидкости, содержащих абразивные частицы, при их нейтральности к поверхности детали.

- эрозионное изнашивание

Термин эрозия объединяет широкий класс видов поверхностного разрушения деталей машин под воздействием динамических потоков жидкостей, газов, твердых частиц или электрических разрядов.

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

результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала (рисунок 16.2).



а) общий вид; б) место разрушения.

Рисунок 16.2 – Эрозионное разрушение золотника плунжера керосинового насоса высокого давления

Гидроэрозия – поверхностное разрушение деталей машин при контакте с динамическим потоком жидкостей. Этому виду разрушения подвержены детали гидронасосов, плунжерные пары, трубопроводы и другие детали, работающие в потоках воды, водных растворов, смазочных масел и т.д.

Газовая эрозия – это поверхностное разрушение деталей машин при контакте с динамическим потоком газов и прежде всего с высокой температурой, скоростью и химической активностью (сопла и лопатки реактивных двигателей газовых турбин, клапаны, поршневые кольца, выхлопные трубы и глушители автомобилей и т.д.).

Космическая эрозия – абляция – разрушение поверхности в потоке раскаленных газов, которое происходит в результате эрозии, расплавления и испарения металла.

Электроэрозионному воздействию подвержены токопроводящие материалы под действием импульсного электрического разряда (электроды свечей зажигания, контакты магнитных пускателей и т.д.).

Кавитационное изнашивание – изнашивание поверхности тела в жидкости в условиях кавитации. Кавитация – это процесс образования парогазовых пузырьков в ограниченном объеме потока жидкости (где давление ниже соответствующего давления паров жидкости при данной температуре) и последующего их уничтожения (или сокращения) в зоне повышенного давления (лопатки гидротурбин, гребные винты, омываемые водой гильзы цилиндров в рубашках водяного охлаждения двигателей, трубопроводы).

Многokrатно повторяющиеся удары, в соответствии с рисунком 16.3, вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин.

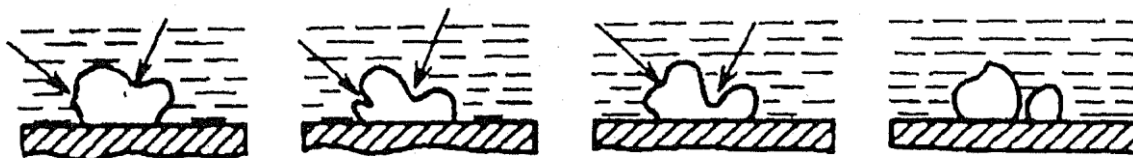
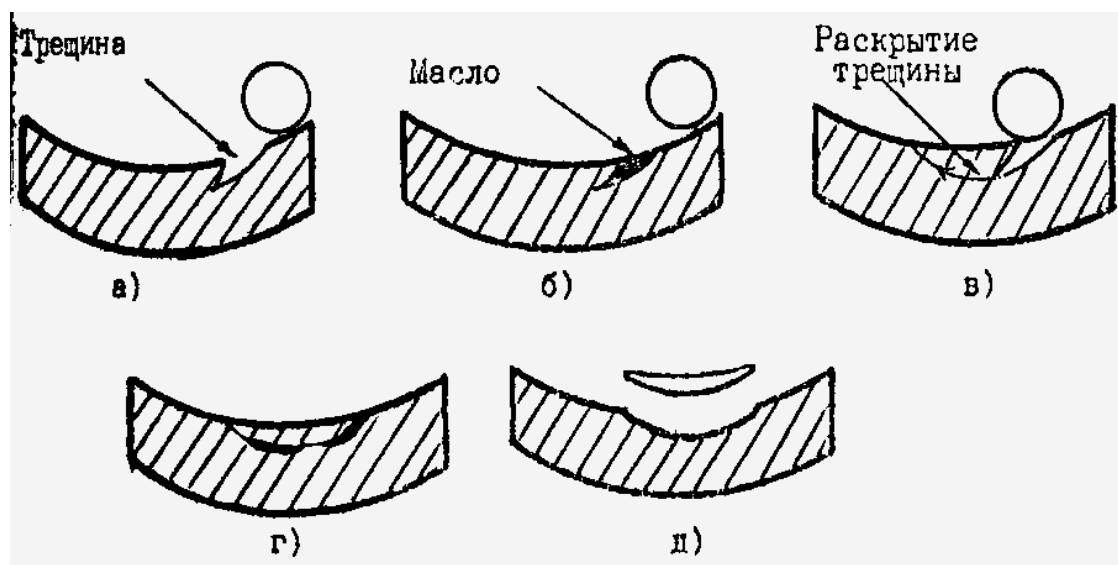


Рисунок 16.3 – Схема гидравлических ударов при сокращении навигационного пузыря

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и природы материала деталей. Влияние вязкости незначительно.

- усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание (контактная усталость) – разновидность механического изнашивания, заключающаяся в усталостном разрушении при повторном деформировании микрообъектов материала поверхностного слоя, происходит при трении качения и трении скольжения (рисунок 16.4).



1 – шарик, 2 – втулка.

Рисунок 16.4 – Схема образования питтинга при усталостном изнашивании.

Сопротивление контактной усталости называется контактной выносливостью.

При трении качения усталостному изнашиванию подвержены элементы подшипников качения; при трении качения с проскальзыванием – зубья колес, валки прокатных станов, колеса рельсового транспорта и другие детали, работающие в условиях трения при многократном соударении контактирующих тел.

б) Молекулярно-механическое изнашивание.

Молекулярно-механическое изнашивание – это изнашивание в результате одновременного механического воздействия и действия молекулярных или атомных сил.

- изнашивание при заедании – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания металла, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.

- схватывание возникает как в процессе трения скольжения, так и качения.

Различают схватывание I и II рода.

Схватывание I рода возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения и высокими удельными давлениями, превышающими предел текучести на участках фактического контакта при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной пленки окислов.

Схватывание II рода возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения ($v \geq 0,6$ м/с) и значительными удельными давлениями, что обуславливает высокий градиент и интенсивный рост температуры в поверхностных слоях и сопровождается разупрочнением металла. Температура в зоне контакта может достигать 1500 °С. При этом образуются структуры отпуска, закалки, вторичной закалки.

Этот вид изнашивания начинается с субмикроскопических повреждений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхностного слоя, различимому невооруженным глазом, и к глубинному вырыванию; затем разрушение может приобрести лавинный характер (рисунок 16.5).

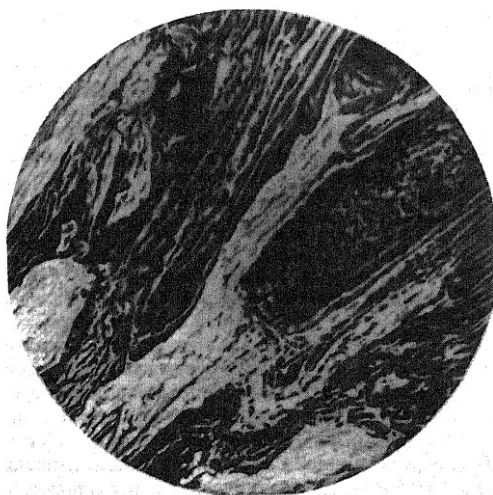


Рисунок 16.5 – Сечение поврежденной поверхности золотника в результате схватывания

При эксплуатации машин для качественной оценки степени повреждения поверхностей используют следующие термины.

Натир — участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление.

Задир — образование в результате схватывания различной невооруженным глазом борозды с оттеснением материала, как в стороны, так и по направлению скольжения.

Заедание — наиболее яркая форма проявления схватывания. Образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей. С заеданием приходится встречаться в тяжело нагруженных подшипниках скольжения, зубчатых зацеплениях, передающих значительные крутящие моменты

в) Коррозионно-механическое изнашивание.

Коррозией называют разрушение поверхности металла в результате химического или электрохимического воздействия среды. Чистая металлическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды. Однако, если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от коррозионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней.

- окислительное изнашивание.

Это изнашивание, возникающее вследствие химической реакции материала с кислородом окружающей среды. 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 (рисунок 16.6).

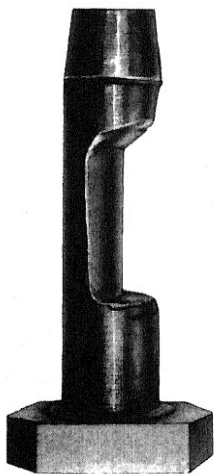


Рисунок 16.6 – Болт крепления коллектора авиационного поршневого двигателя, поврежденной вследствие окислительного изнашивания

В процессе трения в воздушной среде (сухое трение) в условиях контакта со смазкой (граничное или жидкостное трение) контактирующие поверхности металлов окисляются.

При этом образуются окислы металлов с определенными физико-механическими свойствами, экранирующими поверхность трения от молекулярного

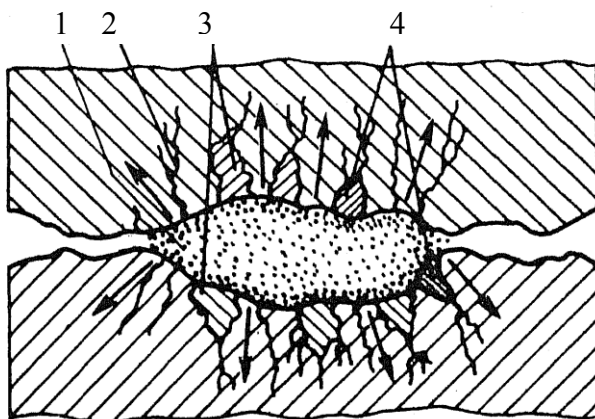
воздействия. Это позволяет исключить схватывание контактирующих поверхностей, стабилизирует износ, повышает износостойкость.

- изнашивание при фреттинг-коррозии.

Фреттинг-коррозия – это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Разрушение заключается в образовании на поверхностях взаимного касания деталей язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Продукты фреттинг-коррозии состоят в основном из окислов.

Механизм фреттинг-коррозии заключается в следующем: под действием силы трения происходит активизация поверхности за счет циклических тангенциальных сил с последующим окислением. Окисление металлов происходит с увеличением объема, что приводит к местному повышению давления в сопряженных замкнутых контурах (рисунок 16.7).



1 – общая большая каверна; 2 – трещины; 3 – отколовшиеся объемы металла;
4 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

Рисунок 16.7– Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии

Это способствует при дальнейшей вибрации разрушению окисных пленок. Кроме того, окислы, как правило, имеющие большую твердость, чем основной металл, оказывают абразивное воздействие

- изнашивание вследствие пластической деформации

Этот вид изнашивания (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов. Пластическое деформирование обычно сопровождает износ металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения (зоны смятия на рисунке 16.8 показаны стрелками).

Смятие может произойти при трении, но может быть и не связано непосредственно со скольжением или качением поверхностей.

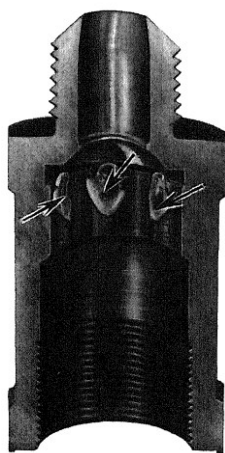


Рисунок 16.8 – Разрез корпуса шарового крана, поврежденного пластической деформацией

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.

- изнашивание вследствие диспергирования

Разрушение поверхностного слоя происходит в результате диспергирования (измельчения) отдельных участков контакта (рисунок 16.9). Интенсивность этого вида изнашивания невысока, а шероховатость поверхности деталей, малая.

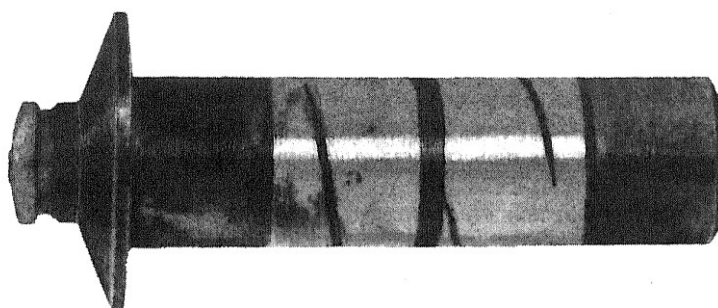


Рисунок 16.9 – Болт шарнирного соединения шасси самолета.

Процесс изнашивания протекает так: на площадках фактического контакта материал подвергается многократной упругой и пластической деформации, что приводит к разупрочнению, разрыхлению в отдельных местах структуры материала с последующим отделением небольших блоков. Изнашиванию вследствие диспергирования подвергаются хорошо смазываемые шарнирно-болтовые соединения, валики различных агрегатов и сопряженные с ними подшипники, поршневые пальцы прицепных шатунов, пары трения топливной аппаратуры и др.

- изнашивание в результате выкрашивания вновь образуемых структур

При тяжелых условиях работы на поверхностях трения происходят физико-химические изменения. Они являются результатом пластического деформирования, повышения температуры слоев металла, прилегающих к зоне контакта, последую-

щего быстрого охлаждения и химического действия окружающей среды (рисунок 16.10).

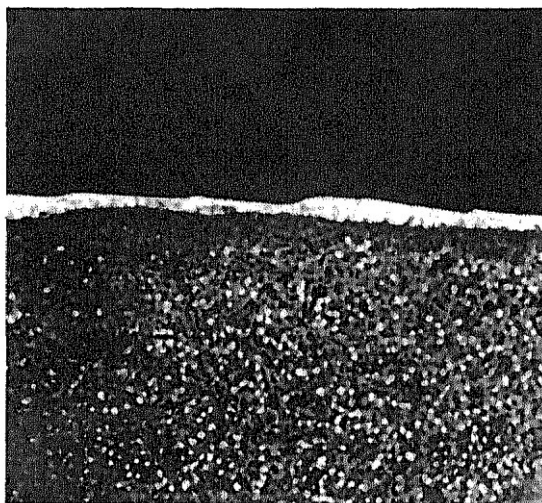


Рисунок 16.10 – Сечение стального золотника с образовавшимся белым слоем на его поверхности в процессе заклинивания в стальной втулке

Процесс возникновения и развития белого слоя на поверхностях трения представляется следующим. На отдельных участках фактического контакта происходит интенсивная пластическая деформация, сопровождающаяся значительным тепловыделением. Теплота, концентрируясь в поверхностных микрообъемах, создает большой температурный градиент по глубине, в результате скорости нагрева и охлаждения микрообъемов больше, чем при термической обработке. Повышение температуры в отдельные моменты выше критической точки приводит к образованию аустенита из феррито-цементитной смеси, а последующее резкое охлаждение — к появлению закалочных структур, которые в дальнейшем, подвергаясь пластической деформации и периодическому воздействию температурного фактора, переходят в белый слой. Аналогично описанному образуется белый слой при «пропахивании» поверхности трения абразивом.

Одновременно с образованием белого слоя возникает система внутренних напряжений, которая совместно с рабочими напряжениями приводит к растрескиванию слоя и выкрашиванию его отдельных частиц. Продукты износа, попадая в зазоры между сопряженными деталями, могут вызывать интенсивное, достигающее до катастрофического, изнашивание.

- водородное изнашивание

Водородное изнашивание происходит в результате наводороживания и охрупчивания стальной поверхности детали при контакте в процессе трения с углеводородными смазками, парами воды, деревом и пластмассой.

При небольших концентрациях водород образует твердые растворы внедрения, располагаясь в междоузлиях кристаллической решетки. При этом происходит увеличение параметра кристаллической решетки.

После достижения предела растворимости в твердом растворе водород образует химические соединения с примесями и легирующими элементами. В чистых металлах образуются гидриды в процессе охлаждения в виде тонких пластинок по границам зерен и вдоль плоскостей скольжения и двойникования, а в сплавах – непосредственно при температуре диффузии.

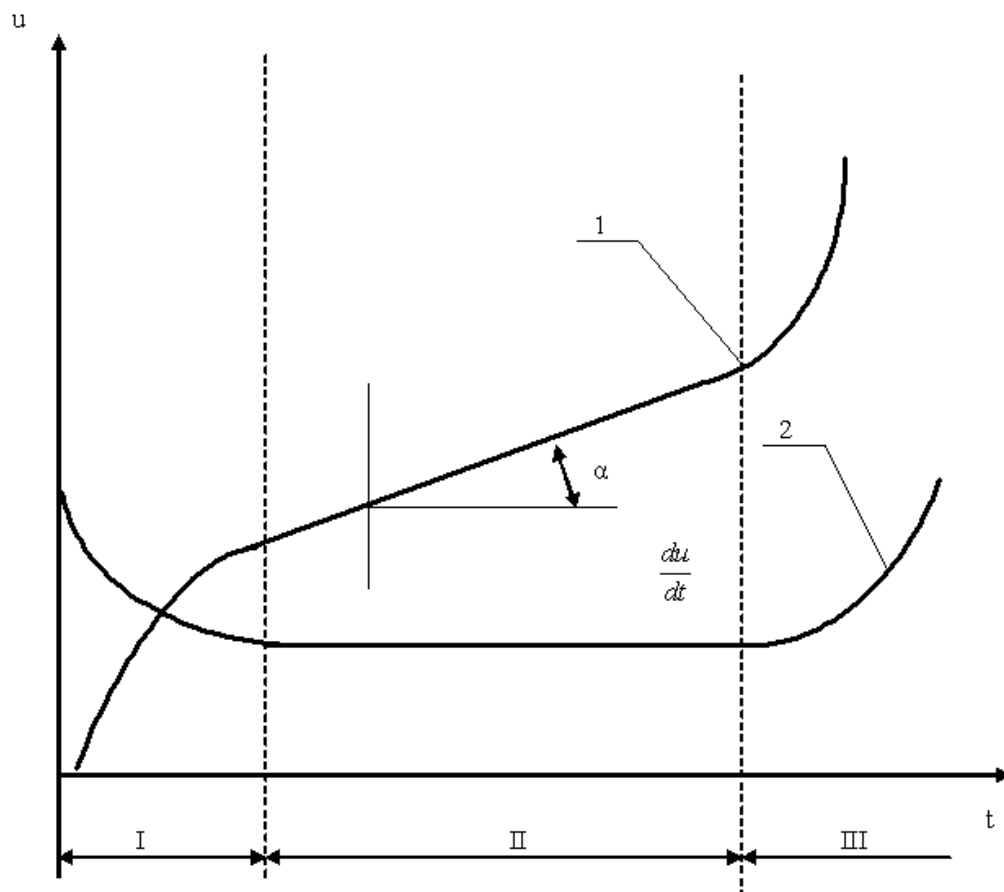
Удельный объем гидридов больше удельного объема металлов, что приводит к возникновению больших внутренних напряжений.

При больших пересыщениях водородом в дефектах и других несплошностях кристаллической решетки возникают высокие давления, приводящие к разрушению металлов.

19.1.3 Стадии изнашивания

Если отложить по оси абсцисс время работы пары трения t , а по оси ординат износ u , то получим кривую изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона α , образованного осью абсцисс и касательной кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

На кривой изнашивания (рисунок 16.11) в общем случае (кривая 1) можно выделить 3 участка.



1 – теоретическая кривая изнашивания;
2 – скорость изнашивания

Рисунок 16.11 – Кривые изнашивания

Эти участки соответствуют 3 стадиям изнашивания:

I – начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке детали;

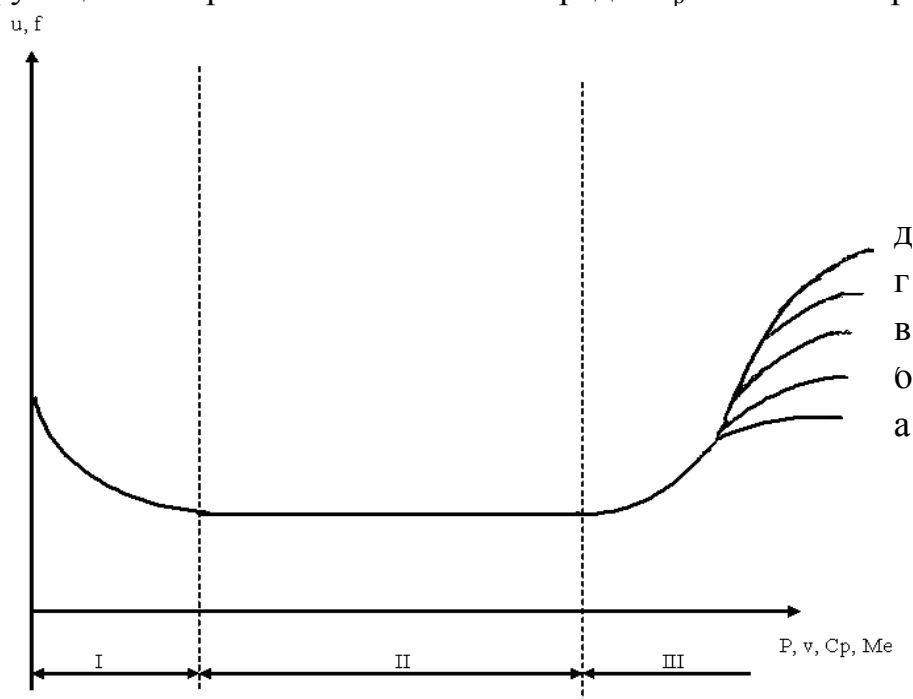
II – (прямолинейный участок кривой) установившееся изнашивание $\text{tg}\alpha=\text{const}$, наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения;

III – процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания.

Кривая 2 изображает скорость изнашивания; определяется как отношение износа детали (образца) к обусловленному пути на котором происходило изнашивание.

16.1.4 Классификация видов изнашивания и повреждаемости материалов деталей машин при трении

Анализ различных видов изнашивания позволяет дать обобщенную зависимость износа от параметров работы узлов трения и материалов трущихся пар. Общая закономерность изменения коэффициентов трения и интенсивности изнашивания u, f в зависимости от нагрузки P , скорости скольжения v , температуры T , природы контактирующих материалов Me и состава среды C_p показана на рисунке 19.12.



I – область неустановившихся процессов; II – нормальный окислительный (механо-химический) износ; III – область патологического износа (недопустимый износ, при котором происходит повреждаемость поверхности, кроме механо-химической формы абразивного износа); а – механо-химическая форма абразивного изнашивания; б – фреттинг-коррозия; в – схватывание 1-го рода; г – схватывание 2-го рода; д – механическая форма абразивного изнашивания

Рисунок 16.12 – Общая закономерность изменения коэффициента трения и интенсивности изнашивания

Основные признаки нормального износа в отличие от различных видов повреждаемости заключаются:

- в отсутствии любых видов разрешения основного металла;
- локализация разрушения в тончайших поверхностных слоях вторичных структур, образующихся при трении;
- в динамическом равновесии механо-химических процессов образования и разрушения вторичных структур, обеспечивающих установившееся протекание процесса.

16.2 Задание

Определить вид и предположить причины износа предложенных образцов

16.3 Порядок выполнения работы

16.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами руководства;

16.3.2 Определите вид износа полученных образцов (в работе используется набор деталей с различными видами изнашивания);

16.3.3 Определите стадии и причины износа полученных образцов;

16.3.4 Сделайте выводы по полученным результатам.

16.4 Содержание отчета

Необходимо указать цель, привести эскиз видов износов предложенных образцов. Сделайте выводы по причинам износа.

16.5 Контрольные вопросы

16.5.1 Какие виды изнашивания Вы знаете?

16.5.2 Перечислите стадии изнашивания и их характеристики.

16.5.3 Какими параметрами характеризуется износ?

16.5.4 Как определяются износостойкость, интенсивность изнашивания, коэффициент трения?

16.5.5 Что называют предельным износом?

16.5.6 Как взаимосвязаны интенсивность изнашивания и коэффициент трения?

17 Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трения и параметров, влияющих на процессы изнашивания

Целью работы является получение практических навыков определения фрикционно-износных характеристик процесса трения и изучение механизма трения и изнашивания.

17.1 Общие сведения

Износ является наиболее распространенным дефектом в современных машинах, явление это весьма опасно. В современной науке разрабатывается отдельное направление, в котором ученые занимаются исследованием вопросов износа – трибология. Последнее время вопросам трибологии уделяется всё большее внимание в силу того, что износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения является основной причиной выхода из строя механизмов и машин. Последние десятилетия характеризуются усилением внимания всех промышленно развитых стран к проблемам трения и изнашивания, вредные последствия которых весьма убыточны. Эти проблемы связаны, прежде всего, с потерями материалов при изнашивании и выходом оборудования из строя, образованием экологически вредных продуктов изнашивания, а также большими энергопотерями. Поэтому важнейшая проблема современной науки о трении – изыскание эффективных методов повышения износостойкости и снижения энергоемкости подвижных сопряжений. Постоянное развитие трибологии обусловлено в первую очередь запросами практики, а также многосложностью процесса трения. Возрастающие требования к изделиям в первую очередь отражаются на ужесточении условий работы узлов трения.

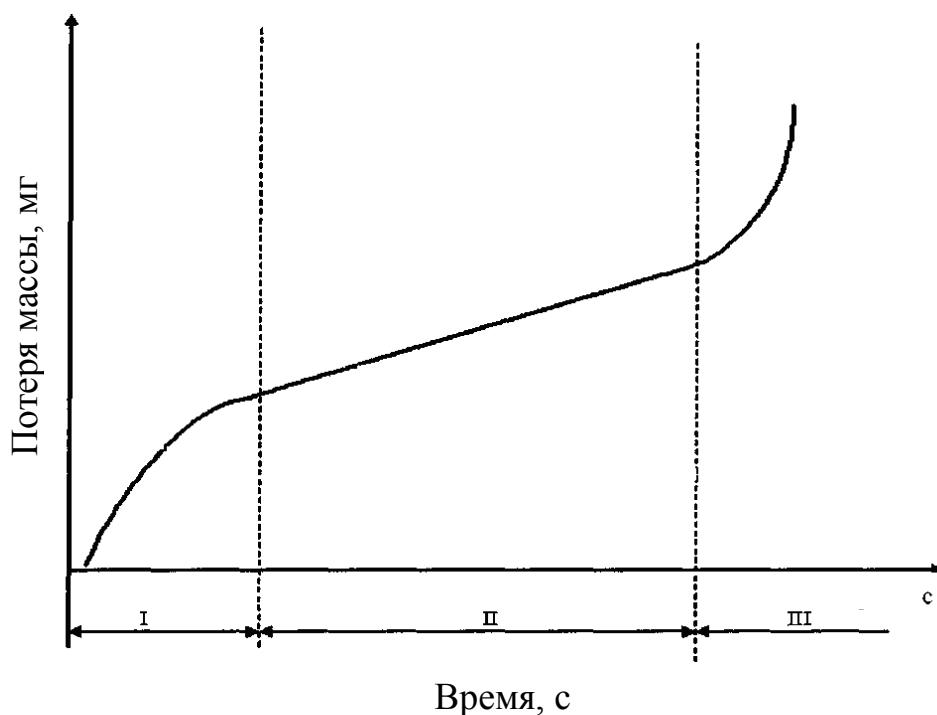
Трение твердых тел – это сложный комплекс взаимодействий, проявляющийся в механических, физико-химических, электрических и других процессах. Соотношение видов взаимодействий может быть самым различным в зависимости от условий нагружения, свойств контактирующих материалов и среды. Трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу, заключающуюся в преодолении адгезионной связи между контактирующими телами и объемным деформировании материала. Адгезия обусловлена силами сцепления, действующими между молекулами и атомами. Если тела достаточно упруги, то образовавшаяся под нагрузкой площадь касания разрушается при снятии нагрузки за счет энергии упругой деформации, и адгезию обнаружить не удастся. Поверхностный слой материала под совместным действием нормальной и тангенциальной сил значительно деформируется. В начальный момент касания поверхность твердых тел волнистая и шероховатая. Поэтому трение развивается в микрообъемах, которые возникают в зонах касания тел пары трения. Под влиянием нагрузки и температуры параметры волнистости и шероховатости изменяются.

Под влиянием сжимающей нагрузки две поверхности по мере сближения соприкасаются во все большем количестве точек. Сначала взаимодействующие элементы деформируются упруго, а затем, по мере возрастания нагрузки, упругая деформация сменяется пластической. Так протекает процесс приработки (рисунок 20.1), отражающий изменение массы образца во времени при испытании трибосопряжения на износ, что соответствует участку I.

Важным направлением современной трибологии является исследование структуры и строения поверхностных слоев металла при трении. Это обусловлено тем, что такие слои ответственны за износостойкость.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях. Износостойкость может служить одним из основных критериев выбора материалов для изготовления узлов трения. Изнашивание прояв-

ляется в постепенном изменении размеров и (или) формы. Величина изнашивания определяется экспериментально. Многолетние исследования позволили разработать методики и создать лабораторное оборудование для измерения изнашивания в различных условиях контактного взаимодействия.



I – процесс приработки; II – нормальный режим трения; III – процесс повреждаемости

Рисунок 17.1 – Схема зависимости износа образца от длительности трибонагружения

Одной из характеристик процесса трения и износа является коэффициент трения.

Изменение величины коэффициента трения от величины удельной нагрузки на узел трения можно представить в виде графика (рисунок 17.2), имеющего три характерных участка: *ab* – переходный, отражающий процесс приспособления поверхностей; *bc* – стационарный, соответствующий нормальному режиму трения и характеризующийся устойчивым коэффициентом трения; *cd* – участок, характеризующий повреждаемость.

При разработке трибосопряжений необходимо обеспечить увеличение отрезка *bc*. Многочисленные экспериментальные и производственные данные показывают, что при одной и той же нормальной нагрузке сила трения может изменяться в широких пределах в зависимости от скорости, температуры и среды. Таким образом, необходимым условием решения задач, связанных с трением, является установление комплекса условий, при котором в зоне трения протекают вполне определенные процессы, обуславливающие те или иные виды взаимодействия контактирующих материалов и среды. Определение диапазона нормального износа имеет практическое значение для предотвращения катастрофического изнашивания материала.

Нормальный износ характеризуется строго определенным состоянием поверхности трения, когда структурные изменения, локализованные в поверхностных слоях, находятся в динамическом равновесии.

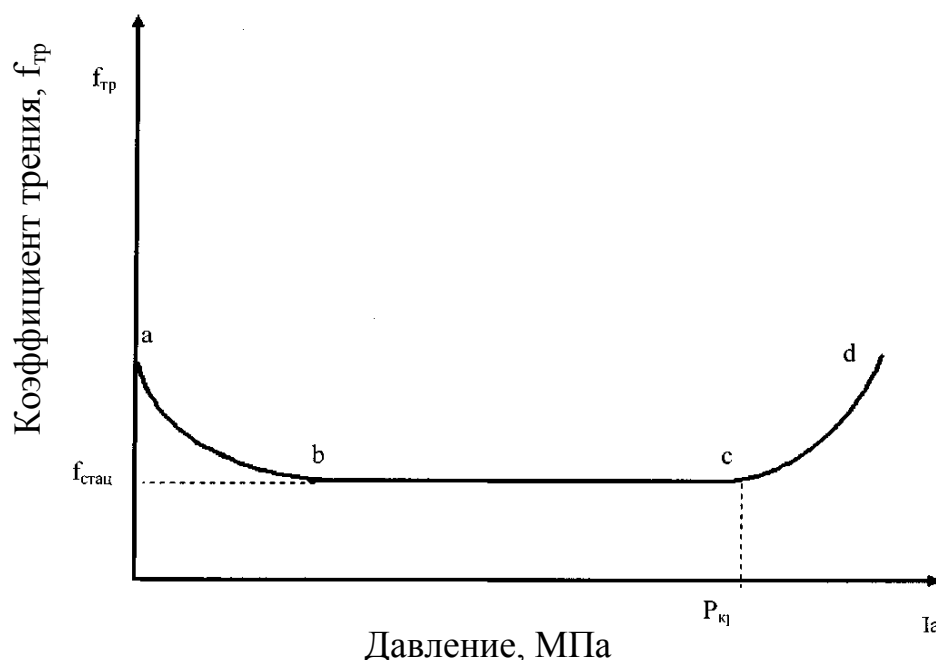


Рисунок 17.2 – Зависимость коэффициента трения от величины удельной нагрузки на узел трения

При нарушении динамического равновесия между разрушением и восстановлением пленок вторичных структур в контакте происходит существенное изменение характеристик более глубоких слоев, и равновесие более не восстанавливается, визуально наблюдается в виде борозд и рытин. При этом наблюдаются характерные изменения силы трения и процесса изнашивания. Графически процесс повреждаемости изображен на рисунке 17.1 – участок III и на рисунке 17.2 – участок cd . Эти участки отражают конечный этап трения, предшествующий разрушению материала. Задачей исследователей является увеличение времени работы материала в стационарном режиме и установление момента перехода к последнему участку для своевременной замены детали и предотвращения повреждения смежных механизмов.

Таким образом, необходимым условием решения задач, связанных с трением, является установление комплекса условий, при котором в зоне трения протекают вполне определенные процессы, обуславливающие те или иные виды взаимодействия контактирующих материалов и среды. Определение диапазона нормального износа имеет практическое значение для предотвращения катастрофического изнашивания материала. Критериями, определяющими надежность работы узлов трения, является минимальная вероятность задира или минимальная интенсивность изнашивания, а также максимальная усталостная прочность. Общая картина усложняется тем, что при трении и изнашивании усталостные процессы носят более сложный характер, чем при обычных циклических нагрузках.

Данные о допустимых изменениях нагрузок, скоростей, условий среды, при которых имеет место нормальный износ деталей, являются основой для проектирования и оценки надежности узлов трения.

Машины для испытания на трение и износ довольно разнообразны. Обычно они обеспечивают широкий диапазон варьирования рабочих режимов, так как испытания требуют учета большого количества факторов, влияющих на результаты. Для проведения испытаний подходят серийные машины трения МИ-1М типа «АМСЛЕР» и СМЦ-2. Испытание состоит в следующем. Образец трется по выбранной схеме трения о ролик вращающийся с постоянной частотой вращения 500 мин^{-1} (окружная скорость в зоне трения $1,31 \text{ м/с}$) при различных режимах нагружения с постоянной или увеличивающейся нагрузкой. Испытания проводят в условиях трения без смазочного материала и с ограниченным или нормальным смазыванием.

Показателями, по которым анализируют поведение материала, являются коэффициент трения и износ при данном сочетании скорости и нагрузки.

Физический износ рассматривается как один из факторов, который существенно влияет на сопротивление усталости образца. Измерение износа может производиться по изменению массы и размеров образцов. Величину массового износа материала оценивают взвешиванием образцов до и после испытаний на аналитических весах. Линейный износ определяется по изменению размера. Интенсивность износа определяется как отношение величины износа к пути трения.

Коэффициент трения рассчитывают по формуле

$$f_{mp} = \frac{M_{mp}}{r \cdot P}, \quad (17.1)$$

где M_{mp} – момент трения, Н·м;

r – радиус образца, м;

P – действующая нагрузка, Н.

Момент трения, возникающий при истирании образцов, определяют при помощи комплекта измерительного К505 переносного (рисунок 17.3), который предназначен для измерений силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

Между мощностью и моментом существует зависимость

$$W = M_{mp} \cdot \omega, \quad (17.2)$$

где ω – угловая скорость, рад/с.



Рисунок 17.3 – Комплект измерительный К505

Чтобы произвести измерение мощности необходимо:

- установить комплект в рабочее положение;
- установить стрелки приборов на нулевые отметки шкал корректорами;
- установить переключатель номинальных токов «В1» в положение «10А», переключатель работы комплекта с отдельным трансформатором тока и без него «В2» — в положение «БЕЗ Тр2», переключатель фаз «В3» — в положение «0», переключатель номинальных напряжений и полярности ваттметра «В4» — в положение «600V» к «+»;
- зажим заземления комплекта соедините с заземляющим устройством;
- включить комплект в схему для измерений (схема включения приведена в табличке, укрепленной на крышке комплекта), источник питания (генератор) — к группе зажимов «ГЕНЕРАТОР» и нагрузку — к группе зажимов «НАГРУЗКА» в соответствии с маркировкой зажимов фаз;
- установить перед измерениями комплектом переключатель фаз «В3» в положение фазы, в которой требуется произвести измерения;
- при малых отклонениях указателей приборов переключенном пределов измерений выбрать нужный предел;
- при измерениях мощности следует иметь ввиду, что при коэффициенте мощности, меньше единицы, может возникнуть недопустимая перегрузка ваттметра,

даже при мощности, меньшей номинальной, поэтому при измерении важно следить за показаниями амперметра и вольтметра и не перегружать их.

Действительное значение измеряемого тока I в амперах; напряжения U в вольтах и мощности W в ваттах определите по формулам:

$$\begin{aligned} I &= C_a \cdot \alpha_a, \\ U &= C_U \cdot \alpha_U, \\ W &= C_W \cdot \alpha_W, \end{aligned} \quad (17.3)$$

где C_a, C_U, C_W — цена деления амперметра, вольтметра и ваттметра соответственно (помещены на лицевой панели комплекта);

$\alpha_a, \alpha_U, \alpha_W$ — отсчет по шкале амперметра, вольтметра и ваттметра в делениях.

При трении под влиянием нагрузки и температуры значительно изменяются свойства материала. Проконтролировать изменение свойств на таком уровне можно при помощи замеров микротвердости. Наиболее широкое распространение получил метод, по которому за меру твердости принимается отношение действующей нагрузки (при выдержке 10 с) к площади поверхности отпечатка от алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположными гранями 136° . Величина нагрузки выбирается в зависимости от вида испытуемого материала в пределах от 0,005 до 0,5 Н.

Приборы для испытания микротвердости вдавливанием либо выполняют в виде отдельных установок, в которых используют вертикальный микроскоп (например, прибор ПМТ-3 конструкции М. М. Хрущева и Е. С. Берковича), либо в виде приспособления к металлографическим микроскопам. Бесспорно, следует отдать предпочтение приборам первой группы.

С помощью окуляр-микрометра измеряют величину диагонали полученного микроотпечатка. Степенной закон (зависимость между силой и размером отпечатка) соблюдается и при испытаниях на микротвердость, но только при условии применения электролитического полирования или травления. Вообще при измерении микротвердости желательно производить электролитическое полирование (или травление).

Рассеяние результатов при измерении микротвердости вообще выше, чем при измерении макротвердости, так как роль случайных погрешностей при первом измерении относительно увеличивается.

17.2 Задание

Провести испытание на трение и определить коэффициент трения предложенных образцов.

17.3 Порядок выполнения работы

17.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- машина трения СМЦ-2;
- комплект образцов;
- весы аналитические ВЛКТ-3;
- прибор ПМТ-3.

17.3.2 Проведение испытаний

17.3.2.1 Взвесить представленные образцы, зафиксировав начальную массу.

17.3.2.2 Под руководством преподавателя установить образцы на машину трения.

17.3.2.3 Провести испытание на трение по следующим схемам.

а) В условиях трения без смазочного материала с возрастающей нагрузкой. Нагрузку увеличивать до значений, соответствующих началу нарушения динамического равновесия, когда начинается интенсивное разрушение поверхностных пленок. Зафиксировать это значение и время испытания. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к заеданию и характерным изменениям структуры нижележащих слоев.

б) В условиях трения без смазочного материала с постоянной нагрузкой равной половине нагрузки, при котором начинается разрушение, зафиксированной в «а)» и том же времени испытания.

в) В условиях трения со смазочным материалом капельным методом: 5 капель через 3 минуты с возрастающей нагрузкой и продолжительностью зафиксированных в «а)».

г) В условиях трения со смазочным материалом капельным методом 5 капель через 3 минуты с постоянной нагрузкой и продолжительностью, зафиксированной в «б)».

д) В условиях трения со смазочным материалом (в ванне) с возрастающей нагрузкой и продолжительностью зафиксированных в «а)».

е) В условиях трения со смазочным материалом (в ванне) с постоянной нагрузкой и продолжительностью зафиксированных в «б)».

17.3.2.4 При испытаниях фиксировать время испытания и момент трения с интервалом в 1 мин.

17.3.2.5 По замерам момента трения оценить коэффициент трения.

17.3.2.6 После испытания взвесить образцы, предварительно промыв их, и оценить массовый износ.

17.3.2.7 Замерить микротвердость непосредственно вблизи зоны трения образцов и на расстоянии 10 мм от зоны трения.

17.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, причины выхода из строя механизмов и машин, определение терминам износ, трение, износостойкость, а также выводы о ходе и времени приработки, о границах нормального трения, о влиянии

смазочного материала на характер трения, о интенсивности изнашивания для всех вариантов трения.

17.5 Контрольные вопросы

17.5.1 Как протекает процесс приработки?

17.5.2 Как зависит коэффициент трения от величины удельной нагрузки?

17.5.3 Какого влияние смазочного материала на коэффициент трения?

17.5.4 Что является необходимым условием решения задач, связанных с трением?

17.5.5 Как определяется коэффициент трения?

18 Лабораторная работа № 3. Определение температурной зависимости удельной теплоёмкости материалов

Целью работы является получение практических навыков определения теплоемкости материалов при различных температурах, изучение метода динамического калориметра.

18.1 Общие сведения

Теплоемкость тела – физическая величина, равная отношению элементарного количества теплоты, поглощенного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к соответствующему приращению температуры тела. Различают удельную (массовую), объемную и молярную теплоемкости. В каждом конкретном термодинамическом процессе теплоемкость оказывается теплофизической характеристикой вещества, однозначно зависящей от температуры и давления, а также от способа подвода теплоты при каком-либо неизменном параметре. Чаще всего такими параметрами являются удельный объем и давление, определяемые при этом удельные теплоемкости называют соответственно изохорной c_p и изобарной c_v , Дж/(кг·К).

В малом интервале температур теплоемкость можно считать постоянной величиной (истинная теплоемкость), в широком интервале пользуются средней теплоемкостью.

Для идеальных газов разность изобарной и изохорной теплоемкостей равна удельной газовой постоянной R , Дж/(кг·К), (соотношение Майера):

$$c_p - c_v = R. \quad (18.1)$$

У жидкостей и твердых веществ разность $c_p - c_v$ незначительна, поэтому в технических расчетах ею часто пренебрегают, пользуясь экспериментальными значениями изобарной теплоемкости.

Теплоемкость является тепловой характеристикой равновесного состояния вещества. В связи с этим все методы ее непосредственного определения должны основываться на переходе системы из одного равновесного состояния в другое посредством поглощения заданного количества теплоты. Одним из методов измерения теплоемкости является метод динамического калориметра, схема которого представлена на рисунке 18.1.

Образец 1 и тепломер 3 монотонно разогреваются тепловым потоком Q , Вт, поступающим от основания 5. Поверхность ампулы 2 отделена от внешней среды адиабатной оболочкой 4.

Тепловой поток Q , Вт, проходящий через среднее сечение тепломера, идет на разогрев образца и ампулы и составляет

$$Q_m = Q_o + Q_a, \quad (18.2)$$

где Q_o – тепловой поток, идущий на разогрев образца, Вт;

Q_a – тепловой поток, идущий на разогрев ампулы, Вт.

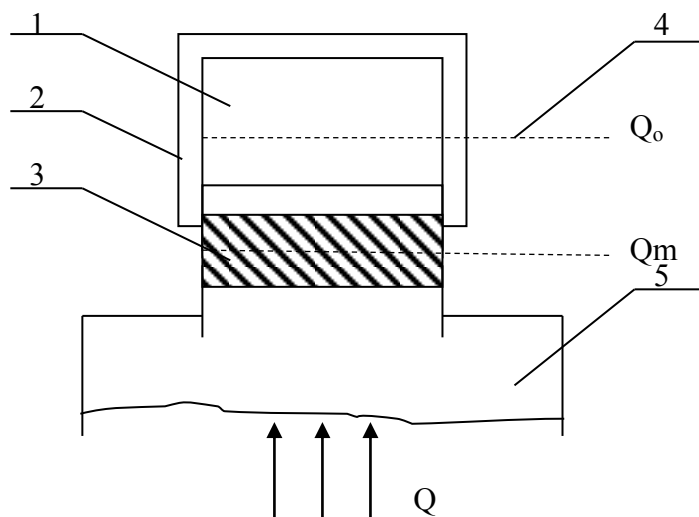


Рисунок 18.1 – Тепловая схема динамического калориметра

Тепловой поток на разогрев образца определяется

$$Q_o = c \cdot m_o \cdot b, \quad (18.3)$$

где c – удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К);

m_o – масса образца, кг;

b – скорость разогрева ампулы, К/с, определяется из формулы

$$Q_a = C_o \cdot b, \quad (18.4)$$

где C_o – полная теплоемкость ампулы, Дж/К.

О величине теплового потока Q_m , проходящего через тепломер, можно судить по величине перепада температур на тепломере $\mathcal{G}_m$, К, и тепловой проводимости тепломера k_m (является характеристикой прибора), Вт/К:

$$Q_m = k_m \cdot \mathcal{G}_m. \quad (18.5)$$

С учетом уравнений (18.3), (18.4) и (18.5) из уравнения (18.2) определяется удельная теплоемкость образца

$$c = \frac{1}{m_o} \left(\frac{k_m \cdot \mathcal{G}_m}{b} - C_a \right). \quad (18.6)$$

При малых перепадах температуры на тепломере можно перейти к измерению времени запаздывания температуры τ_m , с, на тепломере при экспериментах с образцом, учитывая, что

$$\tau_m = \frac{\mathcal{G}_m}{b}. \quad (18.7)$$

Тогда формула (18.6) примет вид

$$c = \frac{k_m}{m_o} (\tau_m - \tau_m^0), \quad (18.8)$$

где τ_m^0 – время запаздывания температуры на тепломере (постоянная прибора) при экспериментах с пустой ампулой, с.

Измеритель теплоемкости, схема которого изображена на рисунке 18.2, состоит из измерительного блока, блока питания и регулирования, гальванометра.

На передней панели измерительного блока установлены термопарный переключатель и переключатель температурных режимов. Образец для испытаний в ампуле устанавливается в измерительную ячейку, находящуюся в верхней выдвижной части измерительного блока.

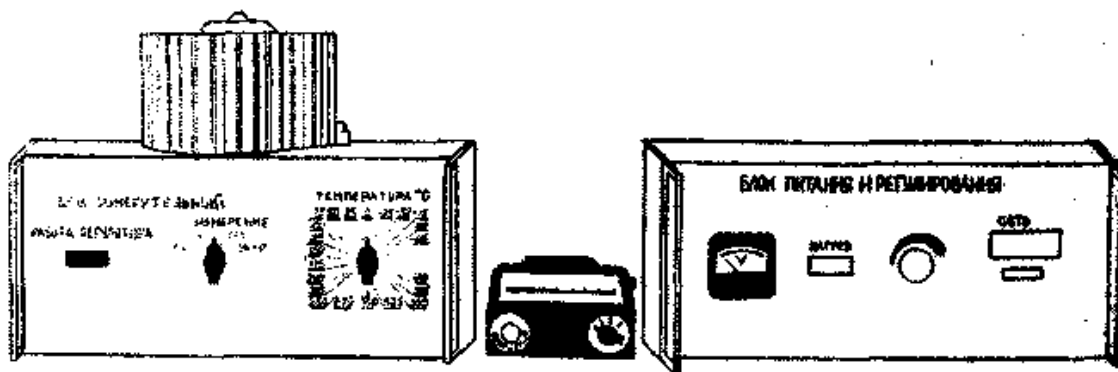


Рисунок 18.2 – Внешний вид измерителя

На передней панели блока питания и регулирования установлены: вольтметр, кнопки сети и управления нагревом, сигнальная лампа и рукоятка для установки начального напряжения. Плавное увеличение напряжения обеспечивается электродвигателем через редуктор. Возвращение рукоятки в исходное положение осуществляется вручную за счет поворота против часовой стрелки с предварительным отжимом ее на себя.

18.2 Задание

Провести испытание для определения теплоемкости материалов предложенных образцов.

18.3 Порядок выполнения работы

21.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- измерительный блок;
- блока питания гальванометра;
- блок регулирования гальванометра;
- комплект образцов;
- весы лабораторные ВМ512.

18.3.2 Проведение испытаний

18.3.2.1 Проверьте соединения блока питания и регулирования, гальванометра и измерительного блока.

18.3.2.2 Переведите переключатели «Сеть», «Нагрев» в положение «Выкл».

18.3.2.3 Подключите блок питания и регулирования и гальванометр к сети 220 В.

18.3.2.4 Установите:

- переключатель «Измерение» в положение «Уст.О»;
- переключатель «Температура» в положение «25 °С» (если комнатная температура превышает 25 °С, то в положение «50 °С»).

18.3.2.5 Выключите арретир гальванометра и произведите коррекцию нуля (ноль гальванометра сместите на 70 делений вправо с целью использования всей шкалы).

18.3.2.6 Взвесьте образец с точностью до 0,001 г (для экспериментов используется медный образец массой 15,412 г).

18.3.2.7 Поднимите верхнюю часть измерительной ячейки.

18.3.2.8 Произведите обезжиривание контактных поверхностей образца, ампулы и крышки бензином и нанесите тонкий слой теплостойкой смазки.

18.3.2.9 В ампуле установите испытуемый образец и закройте ампулу крышкой.

18.3.2.10 Опустите верхнюю часть блока измерительной ячейки.

18.3.2.11 Включите блок питания и регулирования, нажав кнопку «Сеть».

18.3.2.12 Установите по вольтметру начальное напряжение (40 ± 2) В.

18.3.2.13 Установите переключатель «Измерение» в положение « t_1 ». Включите кнопкой «Нагрев» основной нагреватель.

18.3.2.14 Включите секундомер при достижении установленной температуры (при прохождении светового указателя гальванометра через нуль шкалы) и переведите переключатель «Измерение» в положение « t_2 ».

18.3.2.15 Выключите секундомер при прохождении светового указателя через нуль шкалы.

18.3.2.16 Запишите указания секундомера в графу τ_m таблицы 1.

18.3.2.17 Повторите измерения τ_m при всех температурах (от 25 °С до 400 °С).

18.3.2.18 Выключите нагреватель при достижении желаемого уровня температуры (верхнего уровня). Установите переключатель «Измерение» в положение «Уст.О». Заарретируйте гальванометр, проведите охлаждение блока измерительной ячейки до комнатной температуры.

18.3.2.19 Проведите расчет удельной теплоемкости с по формуле (18.8) и данные занесите в таблицу 3.1.

Таблица 18.1 – Результаты экспериментов

Образец для испытаний – медь. Масса – 15,412 г. Размеры: диаметр – 15 мм, высота – 10 мм.				
$t_c, ^\circ\text{C}$	$\tau_m, \text{с}$	$\tau_m^0, \text{с}$	$k_m, \text{Вт/К}$	$C, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$
25		15.1	0.353	
50		15.3	0.360	
75		15.8	0.358	
100		16.0	0.371	
125		16.3	0.378	
150		16.5	0.397	
175		16.6	0.394	
200		16.6	0.400	

18.3.2.20 Сравните полученные данные с известными справочными значениями теплоемкости исследуемого материала (таблица 18.2 и таблица 18.3). Сделайте выводы.

18.3.2.21 Нарисуйте график зависимости $c = f(t_c)$.

Таблица 18.2 – Значения удельной теплоемкости меди

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
0	376	125	403
25	385	150	405
50	392	175	405
75	396	200	408
100	400	225	410

Таблица 18.3 – Теплофизические свойства материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$
Бетон	20	0,834	0,8-1,73
Кирпич	20	0,921	0,6-1,3
Дерево	20	2,51-2,93	0,1-0,16
Керамика	20	0,8	1,7-2,9
Сталь нержавеющей	20	0,475	15
Железо	20	0,5	55
Алюминий	20	0,88	202
Медь (99,99%)	0	0,3791	390
Органическое стекло	20	1,381	0,196
Кварцевое стекло	20	0,7382	1,350
Минеральная вата	200	0,92	0,038
Асбест	20	0,837	0,106

18.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, основные виды теплоемкости, определение терминам теплоемкость (в зависимости от вида), описан метод измерения теплоемкости (метод динамического калориметра), выводы о значении теплоемкости при изучении свойств материалов, о видах теплоемкости, о методах измерения теплоемкости.

18.5 Контрольные вопросы

18.5.1 Что такое теплоемкость материала?

18.5.2 Какие виды теплоемкости Вы знаете?

18.5.3 На чем основываются методы определения теплоемкости?

18.5.4 Опишите метод динамического калориметра.

19 Лабораторная работа № 4. Определение момента трения в подшипниках скольжения на приборе ДП16А

Целью работы является ознакомление с устройством и работой прибора ДП16А для определения момента трения в подшипниках скольжения, определить момент трения и коэффициент трения различных материалов.

19.1 Общие сведения

19.1.1 Этапы испытаний и характеристики пар трения

При исследовании физико-механических свойств новых материалов определяется комплекс характеристик, позволяющих судить о надежности деталей. К этим свойствам относятся предел прочности при растяжении или сжатии, относительное удлинение, ударная вязкость, твердость, износостойкость, коробление и т.д. Для деталей машин и аппаратов, работающих в условиях трения, очень важно проведение испытаний, позволяющих оценить влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на их износостойкость.

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

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

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.

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

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

Износостойкость материала деталей зависит от взаимного перемещения трущихся деталей, состояния материала и его поверхности от скорости движения, температуры, смазки, окружающей среды, от давления деталей друг на друга и, конечно, от природы и свойств материала. Ввиду большого числа параметров, влияющих на трение и износ, целесообразно испытания на трение и износ проводить в четыре этапа (таблица 19.1).

Первый этап включает в себя испытания физико-механических свойств.

На втором этапе определяют триботехнические характеристики на машинах трения СМЦ-2, АЕ-5, ДП16А, МИ-1М, НИДИ, МТ-5, типа Амслера и на других специализированных установках. Приборы для этих целей должны отвечать следующим требованиям: одновременное измерение и фиксирование основных параметров пары трения, момента (силы) трения и температуры деталей и рабочей среды в процессе трения; применение образцов с малыми поверхностями трения, что позволяет постоянно регистрировать суммарный износ пары трения в широком диапазоне

нагрузок и скоростей скольжения. Использование рабочих камер позволяет проводить испытания образцов в газовых и жидких средах, а также в их смесях.

Таблица 19.1 – Этапы испытаний на износ

Этапы	Вид испытаний	Цель испытаний
1	Физико-механические лабораторные испытания материалов	Получение физико-механических свойств материалов и прогнозирование по ним фрикционных и антифрикционных свойств
2	Испытание на трение и износ на лабораторных установках	Оценка влияния физико-механических свойств и режимов трения на фрикционные и антифрикционные свойства материалов
3	Стендовые испытания узлов трения	Оценка влияния конструктивных особенностей узла трения
4	Натурные	Взаимодействие различных узлов механизма, оценка надежности и долговечности работы механизма в целом

Третий этап – стендовые испытания – позволяет изучать влияние различных факторов на работу узлов; создавать стабильный режим нагружения, близко воспроизводящий условия эксплуатации; использовать для ускорения испытаний, увеличенные и учащенные нагрузки по сравнению с эксплуатационными; реализовывать специальные режимы нагружения для сравнения различных конструкций и технологий изготовления.

Четвертый этап – эксплуатационные испытания – позволяет получить наиболее ценные сведения о работе машины в условиях ее службы и является основой для совершенствования конструкции машины, установления предельных эксплуатационных зазоров подвижных посадок, уточнения характера профилактических мероприятий технического обслуживания машины и установления потребности в запасных частях.

В данной лабораторной работе на приборе ДП6А определяются момент (сила) трения и коэффициент трения, что соответствует второму этапу испытаний. Значения коэффициентов трения для некоторых пар трения приведены в таблице 19.2.

Таблица 19.2 – Антифрикционные характеристики пар трения

Пара трения	Удельная нагрузка, Па (кгс/см ²)	Скорость скольжения, м/с	Коэффициент трения	Характер разрушения
1	2	3	4	5
Вал (сталь 45) по контртелу (сталь 10) (без смазочного материала)	490,5·10 ⁴ (50)	0,025-0,5	0,6-1,1	Нет износа
		0,5-1,0	0,5-0,6	Незначительный износ
		1,0-5,0	0,5-0,6	Интенсивный износ

Продолжение таблицы 19.2

1	2	3	4	5
Вал (сталь 45) – контртело (сталь 10) (смазочный материал – масло МС-20)	$245,25 \cdot 10^4$ (25)	0,025-10,0	0,07-0,13	Незначительный износ
		20-100	0,2	Схватывание и интенсивный износ
		150-300	1-6	
Диск (Сталь 45)-контртело серый чугун СЧ21 (смазочный материал – масло МС-20)	$245,25 \cdot 10^4$ (25)	0,025-5,0	0,1-0,35	Нет износа
		50	0,08-0,35	Схватывание и интенсивный износ
Диск (сталь 45) - контртело бронза БрА (смазочный материал – масло МС-20)	$245,25 \cdot 10^4$ (25)	20	До 0,3	Схватывание и значительный износ
Сталь 45-латунь литейная ЛАЖМц66-6-3-2 ЛС59А1Л со смазочным материалом	$245,25 \cdot 10^4$ (25)	10	0,17	Незначительный износ
			0,17	Нет износа
			0,013	
ЖГр1 со смазочным материалом	$245,25 \cdot 10^4$ (25)	Не более 5	0,06-0,08	Незначительный износ
Фторопласт 4 со смазочным материалом	$68,07 \cdot 10^4$ (7)	0,5	0,04-0,08	Нет износа
	$147,15 \cdot 10^4$ (15)	5	0,02-0,08	
Капрон со смазочным материалом	$(147,15-245,25) \cdot 10^4$ (15-25)	0,2	0,7-1,0	Схватывание и интенсивный Износ
	$(196,2-245,25) \cdot 10^4$ (20-25)	0,5	0,08-0,16	Незначительный износ

19.1.2 Назначение, устройство и принцип действия прибора ДП16А

Прибор ДП16А предназначен для определения момента трения в подшипниках скольжения. Работа устройства основана на возникновении момента сил трения, которые появляются при вращении вала в подшипнике скольжения. Воздействуя на

плоскую измерительную пружину, момент сил трения на ее конце создает определенный прогиб.

Прогиб, пропорциональный моменту, изменяет величину светового потока, падающего на фотодиод, при этом величина фототока регистрируется микроамперметром и характеризует величину момента сил трения.

На приборе существует возможность определять зависимости момента трения в подшипнике от скорости вращения вала, величины и направления действующей на подшипник нагрузки, создающейся сменными грузами и зависящей от наклона оси вращения, а также от размеров испытываемых подшипников.

На литой стойке 2 (рисунок 19.1) находятся основные узлы прибора, смонтированные на вертикальной плате 4, закрепленной на основании 1 прибора. На передней панели расположены органы управления и микроамперметр 12.

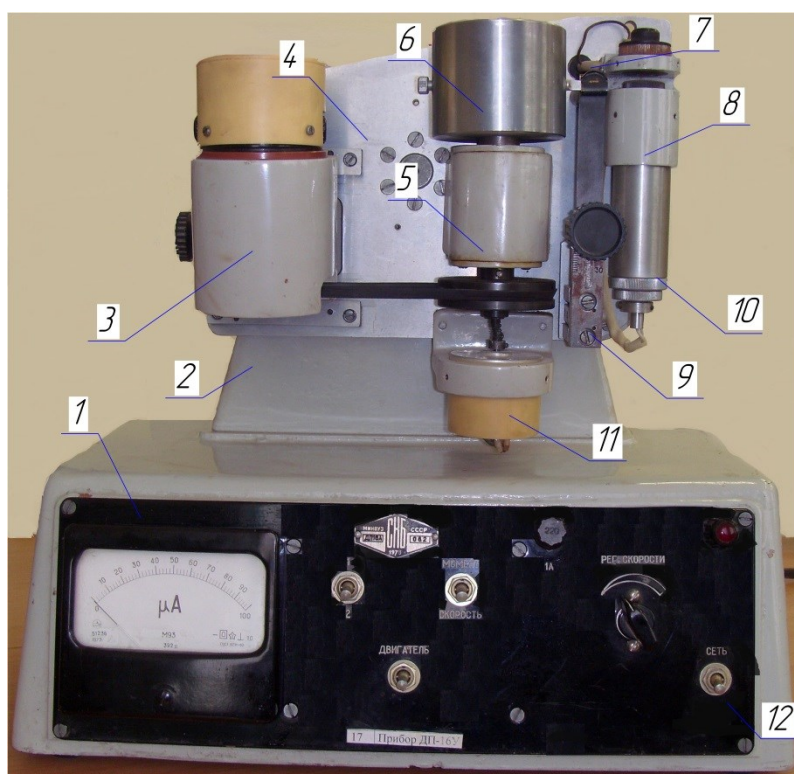


Рисунок 19.1 – Общий вид прибора

Специальный корпус 3, в котором находится электродвигатель, предназначен для уменьшения вибраций на амортизаторах. Энергия вращения передается на рабочий вал при помощи ременной передачи. Натяжение передачи регулируется перемещением корпуса в горизонтальной плоскости.

В шпинделе 5 на двух шарикоподшипниках смонтирован рабочий вал устройства. В верхней части вала имеется отверстие с резьбой, в которое ввинчивается узел испытуемого подшипника 6.

На два сменных узла с разными подшипниками, внутренний диаметр которых соответственно 5 мм и 10 мм, устанавливаются и закрепляются винтами грузы, создающие нагрузку 1 кг и 2 кг. На грузах имеются поводки, входящие в седловину плоской измерительной пружины 7. Связанный с рабочим валом тахогенератор 11

служит для определения скорости вращения. Микроамперметром измеряется ток в цепи тахогенератора.

Момент измеряют устройством, вмонтированным на основании и зафиксированным к плите винтом. Световой поток, создаваемый осветителем 9, зависит от положения шторки, установленной на конце деформируемой пружины. Данный поток определяется фотодиодом 8. Хомут 10 с зажимной рукояткой служит для регулировки жесткости измерительной пружины.

Данная конструкция обеспечивает поворот плиты на 90° в вертикальной плоскости, в результате чего достигается изменение соотношения аксиальной и радиальной нагрузок на подшипник (рисунок 19.2).

Рукояткой с пружинным фиксатором осуществляется поворот плиты. Сектор с пазами, находящийся на противоположной стороне стойки, позволяет фиксировать положение плиты через каждые 15° .



Рисунок 19.2 – Вид прибора Д116А сзади

Электрическая схема прибора приведена на рисунке 19.3

Регулировка частоты вращения двигателя осуществляется потенциометром R4. Бареттер Л1 предназначен для стабилизации тока через осветительную лампу Л2. Потенциометры R1, R2, R5 предназначены для регулировки показаний измерительного прибора ИП в процессе регулирования прибора.

На лицевой панели устройства размещены ручка потенциометра R4 для бесступенчатого регулирования частоты вращения, микроамперметры ИП, сигнальная лампочка Л3, предохранитель Пр и четыре тумблера.

Для включения прибора в сеть постоянного тока служит тумблер В1 «Сеть».

Для изменения чувствительности микроамперметра предназначен Тумблер В2 «1-2».

Для включения электродвигателя М2 устройства служит тумблер В3 «Двигатель».

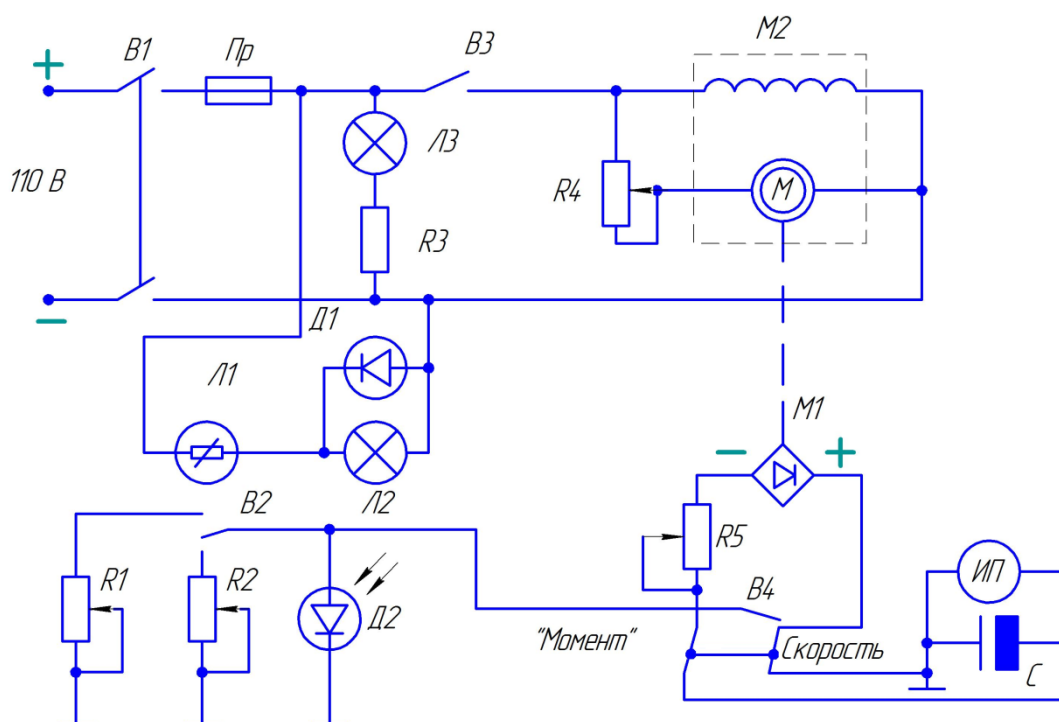


Рисунок 19.3 – Электрическая схема прибора ДП16А

Для переключения микроамперметра с измерения тока тахогенератора М1 (определение скорости вращения рабочего валика) на измерение тока фотодиода Д2 (определение момента трения) используется тумблер В4 «Скорость-Момент».

19.2 Задание

Провести испытание для определения коэффициента трения в подшипниках скольжения

19.3 Порядок выполнения работы

19.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- прибор ДП16А;
- комплект подшипников;
- комплект грузов.

19.3.2 Проведение испытаний

19.3.2.1 Перед работой микроамперметр прибора должен быть отрегулирован и протарирован по моменту и скорости вращения вала шпинделя.

19.3.2.2 Регулировка измерительного устройства производится в следующей последовательности:

а) вывинтить винт, крепящий в рабочем положении кронштейн с измерительным устройством. Кронштейн на петле повернуть на 90° (в верхнее положение) и

закрепить тем же винтом через верхнее отверстие в плите;

б) на панели прибора поставить тумблеры в положение «Момент» и «2»;

в) регулировочными винтами переместить шторку вниз до полного открытия окна фотодиода и установить осветительную систему с учетом полного освещения окна. При этом показания микроамперметра должны быть в пределах 90-100 делений (при необходимости произвести регулировку потенциометром 2);

г) регулировочными винтами переместить шторку вверх до положения, при котором показания микроамперметра составят 1-2 деления. Затем тумблер перевести в положение «1» и снова винтами установить показания 1-2 деления, после чего тумблер переключить в положение «2»;

д) измерительную пружину нагрузить грузами до показаний микроамперметра 35-40 делений. Тумблер перевести в положение «1» и потенциометром 1 довести показания микроамперметра до 90-100 делений.

19.3.2.3 Тарировку микроамперметра по моменту проводят в следующей последовательности:

а) тумблеры на передней панели поставить в положение «2» и «Момент», измерительное устройство должно находиться в горизонтальном положении;

б) нагрузить пружину грузами массой 5, 10, 20, 30, 35 г, отмечая при этом показания микроамперметра. Момент, соответствующий этим показаниям, получают умножением силы (веса груза) на плечо (расстояние от центра тяжести груза до хомута);

в) установить тумблер в положение «1» и произвести тарировку в последовательности, указанной в 3.2 грузами 5, 10, 20 г;

г) измерительное устройство опустить вниз и регулировочными винтами установить шторку в положении, при котором показания микроамперметра составляет 1-2 деления;

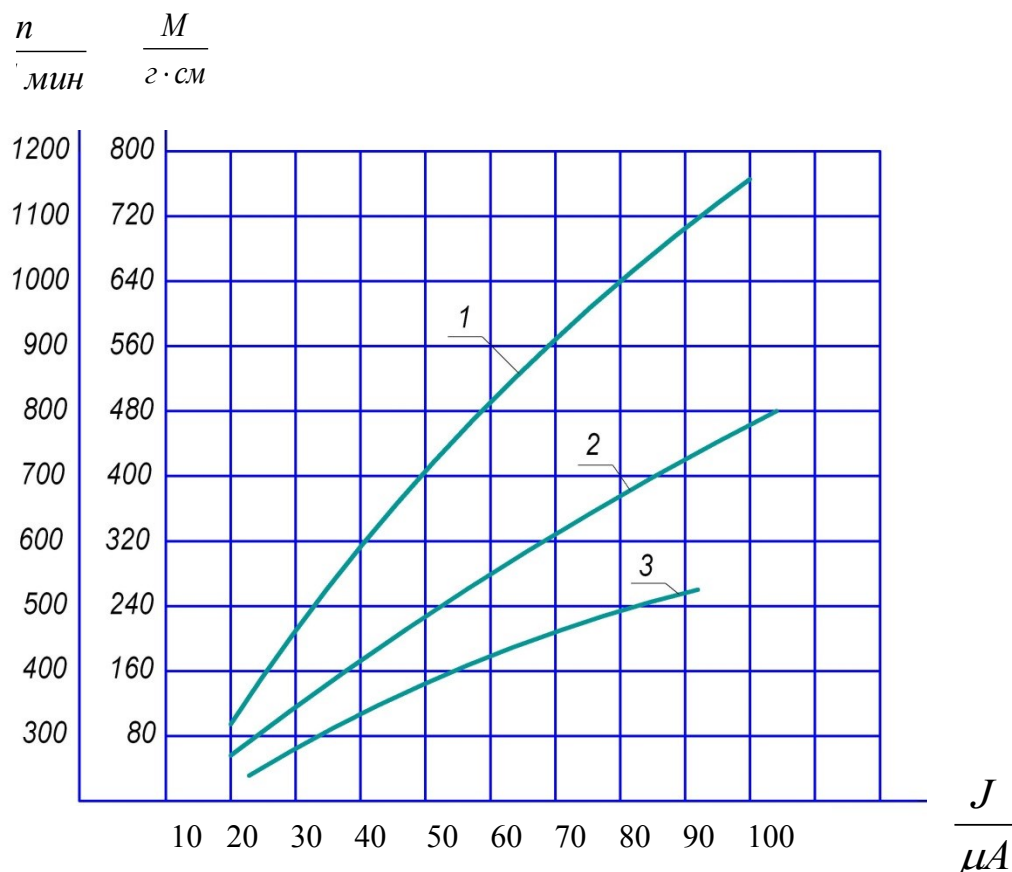
д) по полученным данным построить тарировочные графики по моменту (рисунки 19.4).

По заданию преподавателя произвести измерение момента трения для пар трения в следующей последовательности:

19.3.2.4 Ввинтить сменную ось в рабочий валик. Установить на нее проверяемый подшипник и закрепить его сверху винтом. Затем установить на подшипник груз, зафиксировав сбоку стопорным винтом, ввести при этом поводок груза в седловину измерительной пружины.

19.3.2.5 Поставить тумблеры на передней панели в положение «2», «Скорость», «Двигатель». Выбор скорости вращения вала установить регулятором скорости по тарировочному графику и показаниям микроамперметра.

19.3.2.6 При постановке тумблера в положение «Момент», пользуясь тарировочным графиком, и по показаниям микроамперметра, определить момент трения в подшипнике. Если чувствительность микроамперметра недостаточна, тумблер перевести в положение «1».



1 – график по скорости; 2 – график по моменту в положении «1»;
3 – график по моменту в положении «2».

Рисунок 19.4 – Тарировочные графики по моменту

19.3.2.7 Определить коэффициент трения испытываемых материалов по следующей формуле

$$f = \frac{M}{P \cdot r},$$

где M – момент трения, кг·м;

P – нагрузка, кг;

r – радиус втулки, м.

19.3.2.8 Построить график зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для нагрузок 1 кг и 2 кг.

19.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, принцип работы и назначение прибора ДП16А, схема испытаний, таблица значений коэффициента трения для раз-

личных материалов (по заданию преподавателя), график зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, выводы по выполненной работе.

19.5 Контрольные вопросы

19.5.1 Что называется износом, изнашиванием, интенсивностью изнашивания, износостойкостью?

19.5.2 Как измеряется момент трения на приборе ДП16А?

19.5.3 Что называется коэффициентом трения, и как он определяется?

19.5.4 Влияет ли изменение материала пары трения на коэффициент трения?

20 Лабораторная работа № 5. Лабораторные установки для испытаний материалов на трение и изнашивание

Целью работы является ознакомление с устройством, принципом действия и техническими характеристиками лабораторных установок для трибологических испытаний.

20.1 Общие сведения

Трибометры классифицируют по характеру относительного движения образца (классы: установки однонаправленного относительного перемещения; установки знакопеременного относительного перемещения), внутри каждого класса выделяют две группы машин, которые отличаются по характеру контактирования образца и контртела (машины торцового трения; машины трения с контактом по образующей), внутри каждой группы выделяют две подгруппы, отличающиеся значением коэффициента взаимного перекрытия: $K_{ВЗ} \rightarrow 1$, $K_{ВЗ} \rightarrow 0$.

Такое деление машин трения необходимо для моделирования различных видов разрушения поверхностей трения и для выявления влияния на характер разрушения отдельных факторов (например, физико-химических процессов).

20.1.1 Машина трения МИ-1М (машина Амслера)

Данная машина – одна из первых отечественных лабораторных установок, выпускавшихся серийно. В настоящее время используется для научных исследований, в основном после модернизации отдельных узлов и оснащения дополнительными регистрирующими и измерительными приборами.

Машина трения МИ-1М предназначена для испытаний антифрикционных материалов на трение и изнашивание при качении, качении с проскальзыванием и скольжении. В первых двух видах испытаний в качестве образцов используются ролики (рисунок 20.1а), в условиях трения скольжения один ролик заменяется колодкой (вкладышем) (рисунок 20.1б).

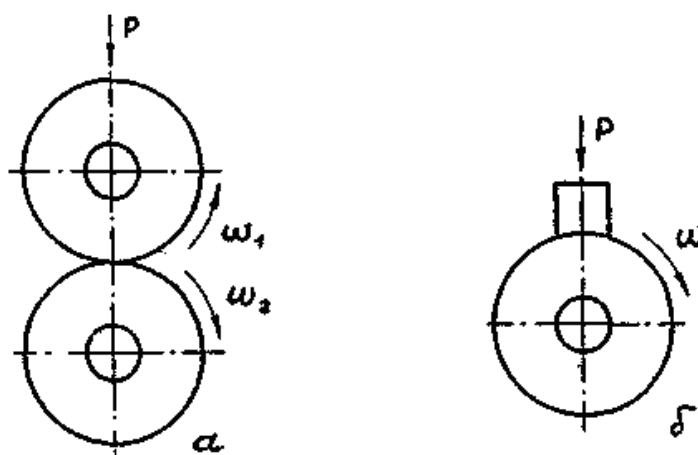


Рисунок 20.1 – Машина трения МИ-1М

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 20.2. Приведение в движение образцов 8 и 9 осуществляется от электродвигателя 1 посредством шестерен 2, промежуточного 3 и вспомогательного 6 валов, шестерен с внутренним зацеплением 7 и сменных шестерен 11. Нагрузка на образцы создается устройством 12 с тарированной пружиной.

Величина проскальзывания верхнего ролика 9 относительно нижнего ролика 8 задается установкой соответствующих сменных шестерен 11; при испытаниях в условиях чистого качения привод верхнего образца отключается.

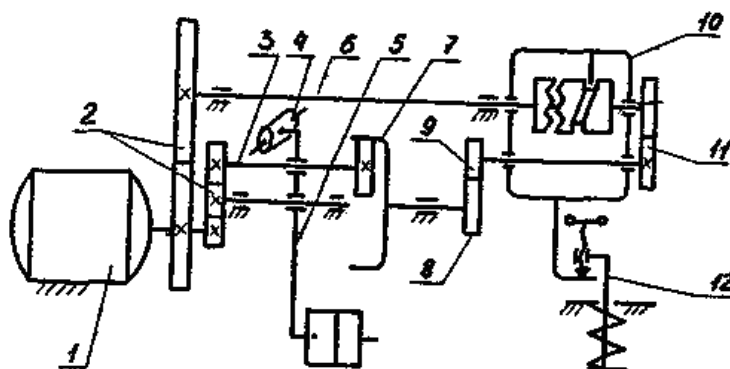


Рисунок 20.2 – Кинематическая схема машины трения МИ-1М

Для закрепления образца-колонки при трении скольжения применяются специальные переходники (оправки); вал верхнего образца в этом случае фиксируется от проворачивания.

В зависимости от модификации машина трения МИ-1М может иметь эксцентриковый механизм, обеспечивающий либо колебательное движение каретки 10 вдоль оси образцов, либо изменение нагрузки на образцы в процессе испытания (динамическое нагружение).

Для измерения и регистрации момента трения служит маятниковое устройство. Отклонение маятника 5 возникающим моментом трения преобразуется в пере-

мещение пера по барабану 4 с диаграммной лентой. Регистрирующий механизм имеет механический привод от вспомогательного вала 6.

Установка имеет механический счетчик числа оборотов нижнего образца.

Износ образцов определяется по изменению массы взвешиванием или измерением линейных размеров. Основные технические характеристики приведены в таблице 20.1.

Таблица 20.1 – Основные технические характеристики машины трения МИ-1М

Технический показатель	Величина
Мощность электродвигателя привода, кВт	1
Частота вращения нижнего образца, с ⁻¹	7
Проскальзывание образцов, %	0, 10, 15, 20, 100
Максимальная нагрузка на пару трения, Н	2000

К основным недостаткам установки следует отнести неудобства, вызванные применением механической регистрации момента трения, в связи с чем затруднен переход с одного предела измерения на другой, а также отсутствие возможности работы с нагрузками, на пару трения в области от 0 до 2000 Н, поскольку минимальную нагрузку определяет вес каретки. Кроме того, конструктивные особенности машины крайне затрудняют размещение камеры для испытаний в жидких средах. Следует отметить повышенный шум при работе установки, что обусловлено наличием значительного числа открытых зубчатых передач.

20.1.2 Машина трения СМЦ-2

Устройство представляет собой логическое развитие принципиальной схемы и конструкции установки МИ-1М, серийно выпускается в настоящее время и также предназначено для испытаний материалов на трение и изнашивание при качении, качении с проскальзыванием и скольжении. Для испытаний применяют образцы (рисунок 20.3): «ролик-ролик» (а), «колодка-ролик» (б), «вал-втулка» (в).

В отличие от МИ-1М в машине трения СМЦ-2 отсутствует маятниковое устройство, а измерение момента трения производится бесконтактным индуктивным датчиком 10 по скручиванию торсионного вала, на котором закреплен нижний образец 9. Клиноременная передача со сменными шкивами 2 в приводе от электродвигателя 1 к шестерням 3 позволяет изменять частоту вращения образцов и снижает шум при работе установки.

В каретке 5, поворачивающейся вокруг оси вала 4, расположены сменные шестерни 6 для привода верхнего образца 8. Передаточное отношение этих шестерен определяет степень проскальзывания образцов при испытаниях на трение качения с проскальзыванием.

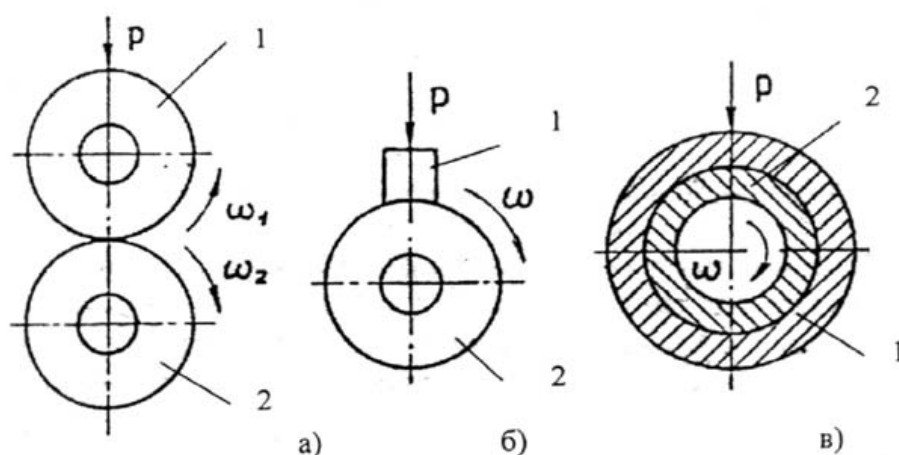


Рисунок 20.3 – Модельные трибосистемы, реализуемые на трибометре СМЦ-2: 1 – образец, 2 – контртело

Кинематическая схема установки показана на рисунке 20.4.

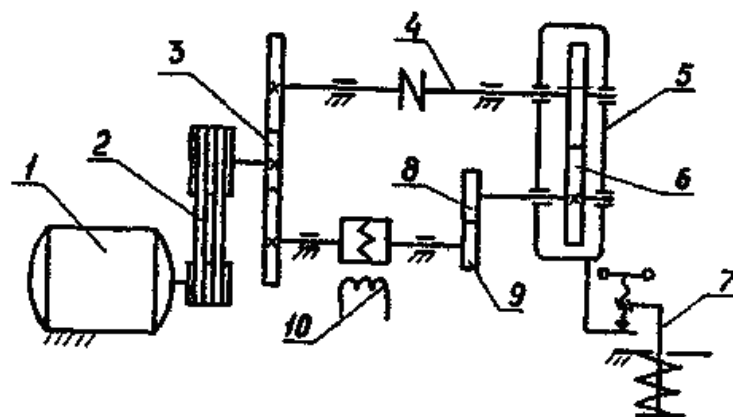


Рисунок 20.4 – Кинематическая схема машины трения СМЦ-2

Нагружение образцов производится пружинным механизмом 7, таким же как и в машине трения МИ-1М. Каретка 5 уравнивается противовесом, что позволяет проводить испытания при малых нагрузках на пару трения.

Для испытаний материалов в жидких средах конструкцией машины СМЦ-2 предусмотрена возможность установки специальных камер.

Момент трения измеряется и регистрируется самопишущим потенциометром типа КСП-2; кроме того, этот прибор обеспечивает подачу сигнала или отключение привода установки при превышении заданной (предельной) величины момента трения. Основные технические характеристики приведены в таблице 20.2.

Таблица 20.2 – Технические характеристики машины трения СМЦ-2

Технический показатель	Величина
1	2
Мощность электродвигателя привода, кВт	2,2

Продолжение таблицы 20.2

1	2
Частота вращения нижнего образца, с^{-1}	5; 8,3; 16,7
Проскальзывание образцов, %	0, 10, 15, 20, 100
Максимальная нагрузка на пару трения, Н	2000

20.1.3 Универсальная машина трения УМТ (УМТ-1)

Данная машина предназначена для испытаний антифрикционных и смазочных материалов на трение и изнашивание. Отличительная особенность машин УМТ – большой выбор схем и широкий диапазон рабочих нагрузок и скоростей относительного скольжения образцов. Конструкцией машины УМТ предусмотрены испытания следующих пар трения (рисунок 20.5): «палец-диск» (а), «колодка-ролик» (б) – при вращательном и качательном движении ролика; «вал-втулка» (в) – при вращательном и качательном движении вала; торцы двух колец (г) – при вращательном движении; «вал-ролики» (д) – при вращательном и качательном движении вала; «стержень-пальцы» (е) – при возвратно-поступательном движении стержня.

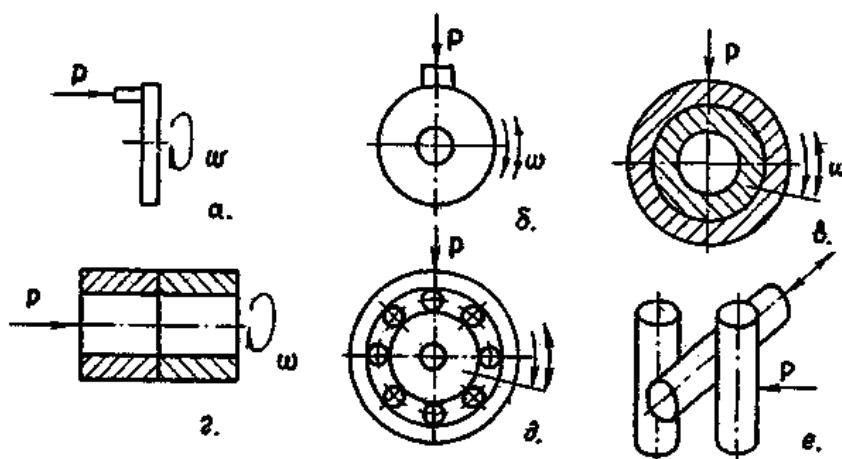


Рисунок 20.5 – Пары трения машины УМТ

На рисунке 20.6 показана кинематическая схема установки УМТ.

Установка состоит из расположенных на станине узла нагружения и измерения 4 и шпиндельного узла, включающего в себя план-шайбу 6, шпиндель 7, червячную передачу 10 и эксцентрик 11. Привод осуществляется от электродвигателя 9 посредством клиноременной передачи 8 со сменными шкивами. Изменение частоты вращения шпинделя бесступенчатое благодаря применению тиристорного управления приводом.

Узел нагружения 4 можно перемещать вдоль оси шпинделя ходовым винтом 1. Нагрузка на образцы создается мембранным пневматическим механизмом 3; диск 5 имеет возможность самоустанавливаться на сферическом шарикоподшипнике. В этом же узле находится и индуктивный датчик момента трения 2.

На рисунке 20.6 показан базовый вариант машины трения, предназначенный для испытания образцов по схеме «палец-диск»; пальчиковые образцы размещаются

на фиксированном радиусе под углом 120° в цанговых зажимах диска 5, образец-диск закрепляется на планшайбе 6. Узел нагружения 4 используется также при испытаниях пары трения «кольцо-кольцо» (рисунок 20.5 г).

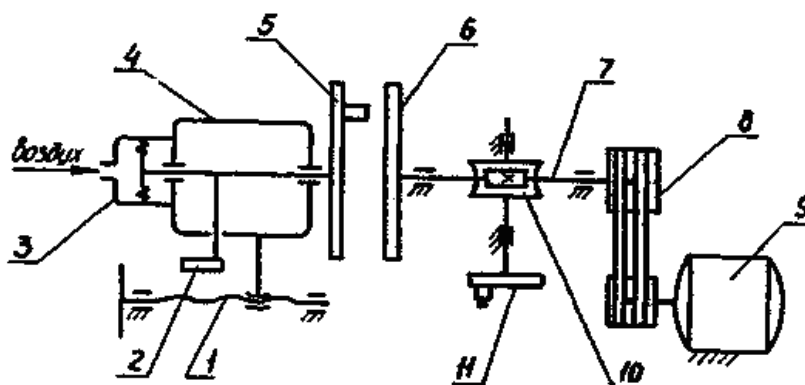


Рисунок 20.6 – Кинематическая схема установки УМТ

Во всех остальных случаях применяются специальные приставки (камеры) с автономными пневматическими устройствами для создания нагрузки. Приставки закрепляются на станине машины трения в зоне между диском 5 и планшайбой 6, при этом возможность измерения момента трения не предусмотрена.

Для создания качательного и возвратно-поступательного движения при соответствующих испытаниях используется кривошипно-шатунный механизм, включающий эксцентрик 11 с приводом от червячной передачи 10 и сменные шатуны, передающие движение к испытательной камере. Амплитуда движения регулируется изменением величины эксцентриситета кривошипа 11.

Конструкция машины предусматривает испытание пар трения в смазывающих и охлаждающих средах.

В процессе работы измерительный блок установки регистрирует частоту вращения шпинделя, количество оборотов шпинделя, момент трения (для указанных выше схем испытаний), температуру в зоне трения. Последние модификации машины трения УМТ комплектуются системой автоматического управления, которая позволяет устанавливать необходимую продолжительность испытания, изменение частоты вращения, шпинделя в процессе испытания, а также управлять работой установки с помощью внешней ЭВМ. Основные технические характеристики приведены в таблице 20.3.

Таблица 20.3 – Техническая характеристика машины трения УМТ

Технический показатель	Величина
Мощность электродвигателя привода, кВт	15
Частота вращения подвижного образца (плавно), C^{-1}	0,4-50
Максимальная нагрузка на пару трения, Н	4000
Максимальный момент трения, Н·м	40

К основным недостаткам установки следует отнести относительную конструктивную сложность образцов, их монтажа и демонтажа, а также невозможность измерения момента трения при испытаниях большей части принятых пар трения.

20.1.4 Четырехшариковая машина трения МАСТ (SETA-SHELL)

Данная машина предназначена для оценки смазочных свойств технологических жидкостей, масел и смазок в режимах трения качения и скольжения.

Кинематическая схема четырехшариковой машины показана на рисунке 20.7.

Схема контакта «шарик по трем шарикам» позволяет реализовать в зоне трения значительные контактные напряжения (порядка 10^4 МПа). На шпинделе электродвигателя привода 6 в цанговом зажиме закреплен верхний шарик 7. Три нижних шарика 5 находятся в чаше 4, которая имеет возможность свободно поворачиваться относительно основания 2 на упорном шарикоподшипнике 3. Узел трения нагружается рычагом 1 со сменными грузами.

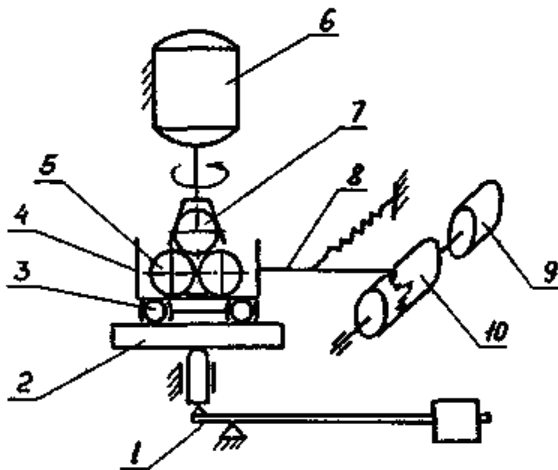


Рисунок 20.7 – Кинематическая схема четырехшариковой машины МАСТ

В процессе работы чаша с шариками удерживается от проворачивания тарированной пружиной 8. Возникающая между шариками сила трения приводит к деформации пружины 8. С помощью специального механизма изменение величины момента трения записывается на диаграммной ленте, закрепленной на барабане 10. Вращение барабана осуществляется от отдельного электродвигателя с редуктором 9.

При испытаниях на трение качения нижние шарики свободно перекатываются в чаше 4; в режиме трения скольжения эти шарикижимаются упорной втулкой с накидной гайкой (рисунок 20.8).

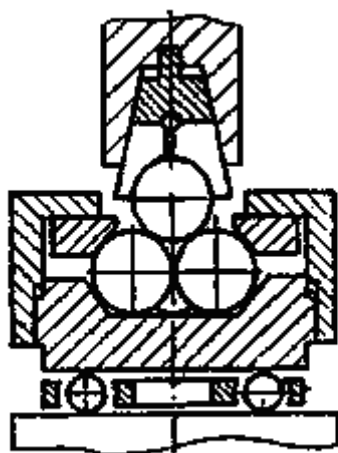


Рисунок 20.8 – Схема контакта «шарик по трем шарикам»

Четырехшариковая машина, как правило, оснащается прибором для определения момента разрыва масляной пленки в зоне контакта шариков или появления усталостных выкрашиваний на их поверхности.

Некоторые модификации установок выпуска последних лет комплектуются такими приборами при поставке, в остальных случаях применяется унифицированная промышленная аппаратура или различные схемы индивидуального изготовления.

Основной принцип работы подобных следящих систем – измерение вибрации рабочего узла и отключение привода установки (или подача предупредительного сигнала) при превышении заданного уровня вибросмещения.

В качестве датчика вибрации обычно применяется пьезоэлектрический элемент, на выводах которого появляется переменное напряжение в результате его деформации под действием виброускорений. Датчик закрепляется на основании 2 (рисунок 20.7). Основные технические характеристики приведены в таблице 20.4.

Таблица 20.4 – Основные технические характеристики четырехшариковой машины трения

Технический показатель	Величина
Максимальная осевая нагрузка, Н	2000
Частота вращения верхнего шарика, с ⁻¹	50
Диаметр шариков, мм	12,5

Четырехшариковые машины можно использовать для проведения испытаний материалов на контактную выносливость, определяя продолжительность работы (число циклов нагружения) верхнего шарика до появления единичного выкрашивания, однако при этом значительные трудности представляют изготовление из испытуемых материалов образцов-шариков с высокой точностью формы размеров и высокой чистотой поверхности.

20.1.5 Установка газоабразивного изнашивания типа ЦУК

Эта машина предназначена для исследования закономерностей изнашивания материалов струей абразивных частиц. Установка выполнена на базе центрифуги ЦЛС-31М, ее принципиальная схема показана на рисунке 20.9.

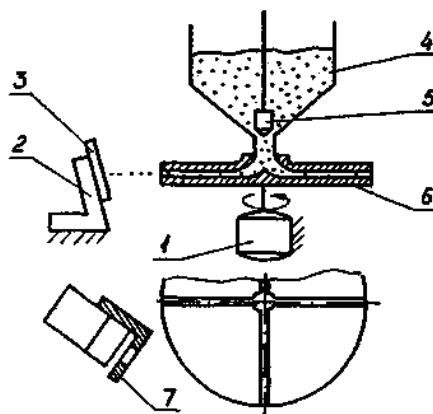


Рисунок 20.9 – Принципиальная схема установки газоабразивного изнашивания типа ЦУК

Абразивный материал из бункера 4 через дозирующую заслонку 5 поступает в радиальные каналы ротора 6, приводимого во вращение электродвигателем 1. Под действием центробежных сил частицы выбрасываются из ротора и соударяются с поверхностью образцов 3. Образцы равномерно расположены по окружности центрифуги и закрепляются на стойках 2, угол наклона которых относительно оси абразивного потока (угол атаки) может изменяться. Для нормирования диаметра струи частиц перед образцами устанавливаются маски 7 с отверстием диаметром 14 мм.

Конструкция установки позволяет производить испытания одновременно 12 образцов, часть из которых при этом являются эталонными. Основные технические характеристики приведены в таблице 20.5.

Таблица 23.5 – Основные технические характеристики установки ЦУК

Технический показатель	Величина
Скорость абразивных частиц, м/с	до 120
Диаметр ротора, мм	285
Угол атаки, град	15, 30, 45, 60, 75, 90
Максимальный размер абразивных частиц, мм	0,45
Масса абразива в бункере, кг	10

20.2 Задание

Изучить принципы работы, конструктивные особенности и назначение машин трения и научиться проводить испытания на износ.

20.3 Порядок выполнения работы

20.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- машина трения МИ-1М;
- машина трения СМЦ-2;
- комплект грузов;
- весы лабораторные ВМ512;
- штангенциркуль;
- комплект образцов, предназначенных для износа.

20.3.2 Проведение испытаний

20.3.2.1 Определить размеры и точный вес предложенных образцов при помощи штангенциркуля и аналитических весов.

20.3.2.2 В течении 20 минут провести испытания разных образцов на узле трения на машинах трения МИ-1М и СМЦ-2 при различных нагрузках.

20.3.2.3 Подсчитать величину линейного износа и массового износов.

20.3.2.4 Сделать сравнительные выводы по получившимся результатам.

20.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о принципах работы и назначение машин трения МИ-1М, СМЦ-2, УМТ, МАСТ, ЦУК, схемы испытаний, величины износов, подсчитанных разными методами, выводы по выполненной работе.

20.5 Контрольные вопросы

20.5.1 По каким признакам классифицируют трибометры?

20.5.2 Для чего предназначена машина трения МИ-1М?

20.5.3 Как работает машина трения СМЦ-2?

20.5.4 Как определяется износ при помощи универсальной машины трения УМТ?

20.5.5 На чем основан принцип действия четырехшариковой машины трения МАСТ (SETA-SHELL)?

20.5.6 Опишите принцип работы установки газоабразивного изнашивания типа ЦУК.

21 Лабораторная работа № 6. Определение триботехнических характеристик подшипника скольжения на машине трения

Целью работы является экспериментальное определение триботехнических характеристик подшипников скольжения в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов его работы.

21.1 Общие сведения

Опоры вращающихся деталей, соприкасающиеся поверхности которых находятся в относительном движении и разделены слоем смазочного материала, называются подшипниками скольжения. Цапфой называется часть вала, которая находится в контактировании с отверстием в корпусе подшипника, а часть корпуса подшипника, сопряженная с ней, вкладышем.

Минимальный коэффициент трения и отсутствие износа наблюдаются при оптимальном режиме работы подшипников – режиме жидкостного трения, при котором полностью исключен контакт деталей. Для этого требуется постоянная подача жидкости в подшипник. Если количество смазочного материала недостаточно, то наступает режим полужидкостного трения подшипника, и его работа может привести к нагреву, повышенному износу, задиру и т. д.

В качестве рабочей среды в подавляющем большинстве случаев для подшипника скольжения используются смазочные маслоподобные материалы, но иногда в качестве рабочей жидкости применяются и другие материалы. Следует отметить, что нередко для смазки целесообразно применять воду и некоторые другие жидкости. В основном это зависит от назначения подшипника (например, в насосах перекачки воды).

Способность жидкости под действием силы сопротивляться сдвигу называется динамической вязкостью. Этот показатель является важной характеристикой смазывающего материала. Единицей в СИ динамической вязкости служит сила, измеренная в ньютонах, необходимая для перемещения слоя жидкости со скоростью 1 м/с высотой в 1 м и площадью в 1 м². Еще одним важным параметром смазывающего вещества является вязкостно-температурная характеристика (ВТХ) – зависимость вязкости смазывающего материала от температуры этого материала.

К выбору материалов соприкасающихся поверхностей предъявляются особые требования: высокая чистота обработки поверхности цапфы вала, а для повышения ее износостойкости следует производить термообработку (закалка и низкий отпуск) этой части вала или покрывать износостойкими материалами (ХТО, напыление, наплавка).

21.1.1 Режим жидкостного трения

Применение подшипников скольжения, которые работают в режиме жидкостного трения, в основном осуществляется в качестве опор высокооборотных валов. Чтобы рассчитать такие подшипники, строго говоря, необходимо решать сложную

гидродинамическую задачу. Однако в инженерных расчетах используют следующий прием: принимают упрощенную модель, у которой между двумя абсолютно жесткими параллельными пластинками находится вязкая несжимаемая жидкость, обладающая изотермическим ламинарным течением. Причем одна из пластин неподвижна, а другая движется с некоторой скоростью (напомним, что на поверхностях контакта с пластинками при ламинарном течении скорости движения частиц жидкости равны скоростям самих поверхностей). При этом частицы жидкости перемещаются только вследствие действия постоянной силы трения.

В такой постановке задача является классической, используемой для расчета параметров течения жидкости, и в механике жидкости и газа называется задачей Рейнольдса. Она может быть широко использована для расчета огромного класса подшипников скольжения.

21.1.2 Практические методы расчетов радиальных подшипников, работающих в условиях жидкостного трения

При проектировании подшипников скольжения одной из основных задач является подбор его геометрических размеров. В ходе проверочного расчета эта задача может быть решена подбором материалов, некоторых их характеристик, размеров подшипника, а после этого осуществляется проверка правильности принятого решения. Многократно повторив эту операцию, далее в ходе проверочного расчета дается возможность выбора оптимальных вариантов конструкций, которые являются наиболее подходящими для данных условий. Для этих целей эффективно применять персональный компьютер, а для принятия окончательного решения следует сформулировать ряд требований, предъявляемых к подшипнику.

21.1.3 Критерии работоспособности

Допускаемая температура подшипника в рабочей зоне и минимальная толщина пленки смазочного материала являются критериями работоспособности опор скольжения. Вследствие чрезмерного нагружения опоры при малой скорости скольжения может быть потеряна несущая способность пленки. Также это может произойти вследствие теплового разрушения. Как известно, с уменьшением толщины пленки сильно увеличивается сопротивление продавливанию, поэтому в опоре трения потеря грузоподъемности происходит в основном по причине теплового разрушения пленки смазочного материала. Процесс теплового разрушения смазывающей пленки сводится к следующему. Предположим, что по какой-либо причине температура в рабочей зоне достигла такого значения, при котором вследствие падения вязкости смазки и уменьшения запаса толщины смазочного слоя произошел переход подшипника в режим полужидкостной смазки. Возрастание коэффициента трения приводит к прогрессирующему увеличению тепловыделения до тех пор, пока температура смазочной пленки достигнет критического значения, при котором теряются смазочные свойства, и возникает непосредственный контакт отдельных участков трущихся поверхностей.

Минимальная толщина смазочного слоя h_{min} является другим основным параметром, характеризующим режим жидкостной смазки. В отличие от идеальных подшипников, в реальных подшипниках поверхности трения имеют шероховатости, искажения геометрической формы, а иногда деформации и монтажные перекосы осей. В реальных подшипниках разделение смазочным слоем трущихся поверхностей цапфы и вкладыша наступает при значительно большей толщине слоя, чем толщина граничного слоя смазки (0,1-0,3 мкм). Работа подшипника жидкостной смазки устойчива при соблюдении условия

$$h_{min} \geq h_{кр} + 2, \text{ мкм.}$$

Предельная толщина слоя $h_{кр}$, являющаяся границей перехода подшипника из полужидкостного режима в режим жидкостной смазки или обратно, называется критической минимальной толщиной смазочного слоя. Следовательно, появление смешанного режима возникает из-за невыполнения этого условия и ведет к возможным местным перегревам и повреждениям поверхностей. В более тяжелых случаях возможно возникновение полужидкостной смазки, вызывающей заедание и заклинивание деталей в относительном движении.

В общем случае

$$h_{кр} = h_b + h_d + h_n + h_o + h_u, \quad (21.1)$$

где h_b и h_d – высоты микронеровностей поверхностей шипа и подшипника;

h_n , h_o и h_u – величины, учитывающие соответственно перекося, прогиб упругой линии вала по длине подшипника, отклонение от цилиндричности шипа и вкладыша (бочкообразность, конусность, огранка и т.д.).

Под h_n следует понимать не только результат поворота упругой линии, связанной с изгибом вала, но и результат монтажных перекосов. Если вал достаточно жесткий и монтажные перекосы контролируются, то можно принять $h_n = 0$, что характерно для большинства ПС.

Величину h_o следует учитывать в случаях, когда удельная нагрузка достигает больших значений. С достаточной достоверностью можно считать $h_o = 0$ при номинальном давлении $p_m \leq 2$ МПа.

Значением h_u учитываются макронеровности, которые всегда получаются при обработке резанием рабочих поверхностей деталей ПС. Размеры этих макронеровностей обычно ограничиваются допусками на цилиндричность, приняв h_u равным половине суммы допусков на отклонение контуров поперечного сечения шипа и вкладыша по окружности.

Таким образом, допускаемая величина минимального зазора определяется как сумма высот микронеровностей и поверхностей цапфы вала и вкладыша соответственно и допуска цилиндричности.

Для надежности работы ПС задают коэффициент запаса, который определяют по следующей формуле

$$S = \frac{h_{\min}}{h_{кр}}, \quad (21.2)$$

где $h_{\min}$ – расчетная минимальная толщина смазочной пленки, мкм.

Значение коэффициента запаса не должно быть меньше $S = 1,3-1,5$, так как кроме описанных выше параметров на величину минимального зазора может существенно влиять другие погрешности изготовления подшипника.

21.2 Задание

Определить при помощи машины трения основные характеристики работы подшипникового узла

24.3 Порядок выполнения работы

21.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- машина трения СМЦ-2 или установка, позволяющая нагружать узел трения подшипника скольжения и определять момент его сопротивления.
- испытываемый подшипник скольжения.

21.3.2 Проведение испытаний

21.3.2.1 Осмотреть установку и установить испытываемый подшипник скольжения.

21.3.2.2 Установить загрузочное устройство на минимальную величину $N_{\min}$, повесив самый легкий груз, и запустить электродвигатель на минимальную частоту вращения вала $n_{\min}$.

21.3.2.3 Записать обороты двигателя n , об/мин, и показания весового механизма, $P_{\text{вес}}$, кг.

21.3.2.4 Установить новое значение загрузки подшипника, повесив дополнительный груз, и произвести замеры для данного нагружения согласно п. 21.3.2.3.

21.3.2.5 Выбрав все грузы и доведя значения нагружения подшипника до $N_{\max}$, перейти к новому скоростному режиму.

21.3.2.6 Все последующие замеры производить аналогично п. 21.3.2.3 и 21.3.2.4 до максимального скоростного режима вращения вала $n_{\max}$, пройдя весь диапазон частот вращения вала подшипника.

21.3.2.7 Все замеры свести в таблицу 21.1.

21.3.2.8 Остановить установку и приступить к обработке данных, полученных в результате испытаний.

21.3.2.9 Произвести краткий анализ триботехнических характеристик подшипника скольжения.

Таблица 21.1 – Показания весов весового механизма

Частота вращения вала, об/мин	Нагрузка на подшипник скольжения, Н			
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄
n ₁				
n ₂				
n ₃				
n ₄				
n ₅				

21.3.3 Обработка опытных данных

Опытные данные обрабатываются по следующим зависимостям.

Момент сопротивления подшипника скольжения вращению $M_{сop}$, Н·м, определяется по формуле

$$M_{сop} = P_{вec} \cdot 9,8 \cdot L_{в}, \quad (21.3)$$

где $P_{вec}$ – показание весов установки, кг;

$L_{в}$ – плечо весов, м.

Угловая скорость вала подшипника ω , 1/с:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (21.4)$$

где n – частота вращения вала, об/мин.

Мощность механических потерь в подшипнике скольжения N_m , Вт, можно определить по формуле

$$N_m = M_{сop} \cdot \omega. \quad (21.5)$$

Окружная скорость подшипника V , м/с

$$V = \frac{\omega \cdot d}{2}, \quad (21.6)$$

где d – диаметр вала подшипника скольжения, м.

Сила трения в подшипнике скольжения F_{mp} , Н, определится по формуле

$$F_{mp} = \frac{2M_{сop}}{d}. \quad (21.7)$$

Коэффициент трения скольжения

$$f = \frac{F_{mp}}{N}, \quad (21.8)$$

где N – нагрузка на подшипник, Н.

Замеряемые параметры и рассчитанные по ним величины заносятся в протокол испытаний. По результатам испытаний двигателя строятся зависимости $f = f(n, N)$.

По полученной зависимости произвести краткий анализ триботехнических показателей работы подшипника скольжения.

21.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, основные характеристики работы подшипникового узла, описан режим жидкостного трения, приведен расчет радиальных подшипников, выводы о влиянии режимов трения на показатели работы подшипников скольжения и о триботехнических показателях работы подшипника скольжения.

21.5 Контрольные вопросы

21.5.1 Перечислите преимущества и недостатки подшипников скольжения.

21.5.2 Чем функционально отличается расчет подшипников скольжения от расчета подшипников качения?

21.5.3 Что такое несущая способность подшипника скольжения?

21.5.4 Каковы критерии работоспособности подшипника скольжения в результате жидкостного трения?

21.5.5 От каких факторов зависит долговечность подшипников скольжения?

22 Лабораторная работа № 7. Методы измерения износа

Целью работы является ознакомление с методами измерения износа и определение износа одним из предложенных методов, что позволит применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности и проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению.

22.1 Общие сведения

22.1.1 Классификация методов оценки величины износа

При изучении процессов изнашивания, а также для изыскания методов повышения износостойкости необходимо применять соответствующие методы и средства для количественной оценки износа.

Наиболее распространены следующие методы оценки величины износа:

- 1) определение измененных эксплуатационных характеристик детали;
- 2) выявление микрометрическими измерениями суммарного линейного износа;
- 3) взвешивание;
- 4) определение обогащения продуктами износа смазочного масла;
- 5) выявление изменения топографии поверхности методом радиоактивных индикаторов;
- 6) определение величины местного износа методом искусственных баз;
- 7) методы отпечатков;
- 8) метод вырезанных лунок.

22.1.2 Метод оценки величины износа по изменению эксплуатационных свойств деталей

Метод оценки величины изнашивания по изменению эксплуатационных характеристик деталей (например, нарушения герметичности) не учитывает распределение износа в разных участках поверхностей деталей, т.е. является интегральным методом. Изменение размеров влияет на эксплуатационные свойства, по которым и оценивается износ.

22.1.3 Оценка величины изнашивания методом микрометража

Наиболее доступным и распространенным способом оценивания износа является метод микрометрических измерений, опирающийся на осуществлении измерений размеров детали до и после изнашивания.

Преимущества метода: возможность дифференциации износа по разным точкам поверхности, доступность, простота.

Однако, при оценке величины износа неизбежны погрешности, причины которых заключаются в следующем:

- при определении износа по изменению размера в эту величину включается и изменение размера вследствие деформации детали. Если изменение диаметра цилиндрической детали является только признаком изнашивания, то с помощью микрометрических измерений нельзя установить, как распределяется этот износ по различным участкам детали;

- возможные погрешности вследствие непостоянства температуры, при которой производятся измерения, и различия температур измеряемого объекта и инструмента;

- относительно большая погрешность приборов, которая, если величина износа невелика, может оказаться соизмеримой с величиной износа;

- необходимость разборки сопряжения для каждого измерения.

22.1.4 Метод определения износа поверхности детали путем взвешивания

В лабораторной практике определение величины износа, а также определение износа поверхностей небольших деталей часто оцениваются по убыли веса путем взвешивания на аналитических весах. Этим методом измеряют суммарный износ (суммарную потерю массы) по поверхности трения.

Преимущества метода: относительно высокая точность, доступность, простота.

Недостатки метода:

- невозможность раздельного измерения износа в разных точках поверхности;
- разборка сопряжения для каждого измерения;
- неприменимость данного метода к материалам, шаржируемым посторонними частицами или продуктами износа, и материалам, поглощающим смазочный материал или влагу.

22.1.5 Метод обнаружения продуктов износа в масле

Данный метод применяется тогда, когда для оценки износа деталей разборка машины нежелательна. Суть его заключается в том, что периодически отбирают пробы масла и по количеству находящихся в нем продуктов износа судят о степени износа. Мелкие частицы продуктов износа деталей находятся во взвешенном состоянии в смазочном масле. От этого масла отбирается проба, которую затем сжигают. Далее из получившегося остатка химическим или спектральным анализом определяют содержание металла в воде.

Преимущества этого метода:

- высокая чувствительность;
- возможность измерения износа без разборки сопряжения.

Недостатки метода:

- невозможность определения износа каждой детали в отдельности (метод позволяет измерить суммарный износ всего сопряжения);
- сложность (анализ отобранного масла занимает много времени).

Этот метод нашел применение при исследованиях влияния массы на износ деталей цилиндрико-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания.

22.1.6 Метод радиоактивных индикаторов

Этим методом определяют износ детали по интенсивности радиоактивного излучения изотопов, удаляемых с поверхности трения вместе с продуктами износа [1, 3, 4]. Материал изнашиваемых деталей предварительно активируется, т.е. в него вводится определенный радиоактивный изотоп одним из следующих методов:

- 1) введение радиоактивного изотопа в металл при плавке;
- 2) нанесение радиоактивного электролитического покрытия;
- 3) введение радиоактивного изотопа методом диффузии;

- 4) установка радиоактивных вставок;
- 5) облучение детали нейтронами.

По мере изнашивания детали вместе с продуктами износа в масло попадает пропорциональное им количество атомов радиоактивного изотопа. По интенсивности излучения этого изотопа в пробах масла можно судить о величине износа.

Преимущества этого метода:

- 1) возможность измерения износа без разборки сопряжения;
- 2) непрерывное и периодическое измерение износа;
- 3) раздельное (дифференцируемое) измерение износа деталей сопряжения.

Недостатки метода:

- 1) сложность;
- 2) необходимость специального оборудования, помещения;
- 3) необходимость защитных и очистных устройств.

22.7 Метод встроенных датчиков

Этот метод определяет износ детали по изменению линейных размеров (или положения) этой детали фиксируемым датчиком, встроенным в сопряжение. В качестве датчиков применяют различные датчики перемещений (индукционные, пневматические, тензометрические и др.), сигнал от которых записывают при помощи самописца, осциллографа и т.д.

Преимущества метода:

- относительно высокая точность;
- возможность измерения износа без разборки сопряжения;
- непрерывность или периодичность измерения износа.

Недостатки:

- сложность метода;
- потребность в специальном оборудовании;
- затруднительное раздельное измерение износа деталей сопряжения.

22.8 Метод искусственных баз

Этим методом величину износа определяют по изменению разрывов суживающегося углубления (профиль которого известен), выполненного на изнашивающейся поверхности. Такими углублениями могут быть высверленное коническое отверстие, отпечатки в форме пирамиды, вырезанная лунка.

Величину линейного износа при использовании отпечатка квадратной пирамиды на плоской поверхности вычисляют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{1}{m}(d_1 - d_2), \quad (22.1)$$

где Δh – линейный износ в месте отпечатка;

h, h_1 – глубина отпечатка до и после изнашивания;

m – коэффициент пропорциональности (при угле пирамиды $\alpha = 136^\circ$, $m=7$).

Величину износа плоской поверхности методом врезанных лунок (рисунок 22.1) определяют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{l^2 - l_1^2}{8r}, \quad (22.2)$$

где l и l_1 – длина лунки до и после изнашивания;

r – радиус, описываемый вершиной резца.

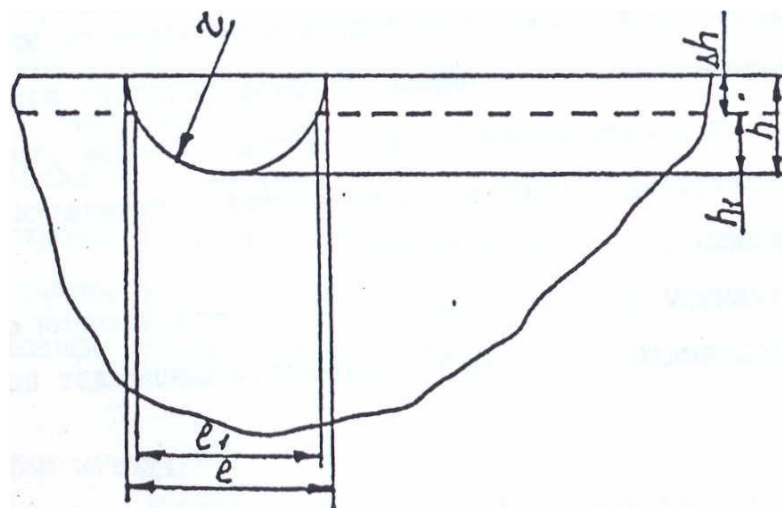


Рисунок 22.1 – Схема изменения износа методом вырезанных лунок

Износ лунки, находящейся на поверхности цилиндрической образующей, вычисляют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = 0.1259(l - l_1^2) \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{R} \right), \quad (22.3)$$

где R – радиус кривизны поверхности в месте нанесения лунки;

плюс – для выпуклых, минус – для вогнутых поверхностей.

Преимущества метода: возможность дифференцирования износа в разных точках, высокая точность.

Недостатки метода: высокая трудоемкость, потребность оборудования для нанесения отпечатков и измерения их величины, искажение формы и местное вспучивание лунок, необходимость разборки сопряжения.

22.2 Задание

Определить при помощи машины трения основные характеристики работы подшипникового узла

22.3 Порядок выполнения работы

22.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- образцы деталей, с нанесенными на них отпечатками пирамиды и вырезанными лунками;
- машина трения (СМЦ-2), позволяющая нагружать узел трения.

22.3.2 Проведение испытаний

22.3.2.1 Получить у преподавателя образцы с нанесенными на них отпечатками в виде квадратной пирамиды на плоской поверхности.

22.3.2.2 По заданию преподавателя провести испытания на узле трения на машине трения при различных нагрузках.

22.3.2.3 Подсчитать величину линейного износа по формуле (25.1).

22.3.2.4 Получить у преподавателя образцы с нанесенными на них углублениями, выполненными методами вырезания лунок на плоской цилиндрической поверхности.

22.3.2.5 По заданию преподавателя провести испытания на узле трения на машине трения при различных нагрузках.

22.3.2.6 Подсчитать величину линейного износа по формулам (25.2) и (25.3).

22.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о методах измерения износа, схема измерения износа методом вырезанных лунок, результаты расчетов по предложенным формулам и выводы.

22.5 Контрольные вопросы

22.5.1 Перечислите наиболее распространенные методы оценки величины износа.

22.5.2 Опишите сущность метода оценки величины износа по изменению эксплуатационных свойств.

22.5.3 Какие преимущества и недостатки метода микрометрических измерений?

22.5.4 В чем заключается сущность метода оценки по убыли веса? Перечислите его преимущества и недостатки.

22.5.5 Как определяется износ методом обнаружения продуктов износа в масле?

22.5.6 Опишите сущность метода радиоактивных индикаторов.

22.5.7 Как определяется износ деталей методом встроенных датчиков?

22.5.8 Дайте характеристику измерению износа методом искусственных баз.

23 Лабораторная работа № 8. Паспортизация деталей и узлов эксплуатационных машин

Целью работы является приобретение навыков выявлять вид износа, особенности и механизм развития ведущего вида износа и составление паспорта на изношенную деталь.

23.1 Общие сведения

Классификация видов изнашивания по процессам создает условия:

- 1) направленной разработки методики исследований процесса трения и износа, создания необходимых для этого испытательных машин и приборов;
- 2) направленного проведения большого круга исследовательских работ в области трения и износа;
- 3) обоснования существующих и разработки новых мероприятий по борьбе с износом в машинах.

На вид изнашивания существенное влияние оказывают:

- а) внешние механические воздействия;
- б) среда;
- в) материал и способы его обработки.

Поэтому для активного изучения видов изнашивания в реальных деталях машин необходимо исследования их проводить с учетом всех указанных групп факторов, влияющих на износ.

В результате такого исследования выясняются основные характеристики основных факторов, определяющих вид износа, и выявляются во всех деталях процесс, происходящий при изнашивании.

Структурная картина выявленного процесса, его количественные характеристики позволяют совершенно определенно решить вопрос о виде изнашивания, об особенностях его протекания и о предпосылках его устранения или уменьшения.

Наиболее обоснованным, надежным и активным методом определения вида изнашивания является паспортизация узлов и деталей машин, подлежащих исследованию.

Основная цель составления паспорта исследуемых узлов и деталей заключается в том, чтобы выявить ведущий вид изнашивания, выяснить особенности и механизм его развития.

В основу составления паспорта положено детальное изучение трех основных групп факторов, определяющих качественные и количественные показатели износа.

В первом разделе паспорта помещены данные о характеристиках материала и поверхностей контакта исследуемых деталей после их изготовления или ремонта.

Основными из них являются:

- весьма краткие сведения о технологии изготовления детали;
- общая характеристика металла, его физические и механические свойства;
- геометрические характеристики деталей;
- характеристики поверхностей трения.

Второй раздел паспорта содержит данные о внешних причинах, влияющих на вид изнашивания. В этот раздел включены группы факторов внешних механических воздействий, температуры и факторов среды. Эти факторы в значительной степени определяют количественную и качественную стороны развития процесса изнашивания.

К их числу относят:

- условия работы деталей (скорость скольжения, удельное давление);
- температура в зоне трения;
- среда, в которой работают детали и смазка (газовая среда, абразивная среда).

Третий раздел паспорта содержит важнейшие характеристики развития процесса изнашивания исследуемых деталей:

- время работы деталей;
- скорость износа;
- геометрические характеристики износа, т.е. измерения размеров и форм деталей в процессе изнашивания;
- микрорельеф и характер изношенной поверхности;
- характер поверхностного слоя изношенной детали;
- остаточные напряжения в поверхностном слое;
- установленный вид износа.

По материалам паспортизации можно составить полное представление о влиянии материала деталей, способов его обработки, внешних механических воздействий и факторов среды на качественные и количественные характеристики изнашивания исследуемых деталей и определить ведущий вид изнашивания.

Форма разработанного паспорта и пример применения системы паспортизации представлены в таблице 23.1.

Таблица 23.1 – Паспорт уплотнительного кольца неподвижной шестерни редуктора

1 Характеристика новой детали		
Краткая технология изготовления		Литье, отжиг 450 °С
1	2	3
Общая характеристика сплава	а) марка сплава	Бронза БрОС 16-5
	б) химический состав, %	Al – 0,02; Zn – 0,20; Sn – 15-17; Fe – 0.30; Si – 0,02; Pl – 4-6; P – 0,20; Sb – 0,30, Cu – 79.
Механические свойства	Предел прочности Предел текучести Относительное удлинение Относительное сужение Ударная вязкость Твердость	$\sigma_B = 250$ МПа - $\delta = 0,5$ % - - HB = 100 МПа

Продолжение таблицы 23.1

1	2	3
Физические свойства	Теплопроводность Линейный коэффициент расширения Удельный вес	$\lambda = 0,80 \text{ Вт/(м·град)}$ $\alpha = 19,42 \cdot 10^{-6}$ $\gamma = 9,0$
Геометрическая характеристика	Размер изнашиваемой поверхности Класс точности Конус Овал Гипербола Зазор в паре	$d = 122 \text{ мм}, h = 2.5 \text{ мм}$ 12 0,02 мм 0,02 мм - нет
Качество поверхности трения	Класс шероховатости Структура поверхностных слоев в сечении Микротвердость	- - -
2 Характеристика работы детали		
Условия работы детали	Скорость относительного перемещения	Номинальная Максимальная Минимальная
	Удельное давление Температура поверхностных слоев трущихся пар Характер нагрузки (постоянная или знакопеременная, пульсирующая)	9,24 м/с 10,0 м/с 0,0 м/с 0,60-42 МПа 80-90 °С переменная
Условия смазки	Коэффициент трения Материал смазки Давление смазочного материала Температура смазки Способ фильтрации смазочного материала Вид трения (жидкостные, граничное или сухое) Схема подвода смазки	0,13-0,15 МС-20, МК-22 5-12 МПа 40-115 °С Сетчатые и щелевые фильтры Граничное и сухое Под давлением
Существующий межремонтный ресурс Амортизационный срок службы		380 ч 2800 ч

Продолжение таблицы 23.1

3 Характеристика износа детали	
1 Время работы детали	400 ч
2 Число пусков и остановок	300-350
3 Средний темп износа	0,08 мкм/ч
4 Геометрическая характеристика износа	-
5 Микрорельеф поверхности	-
6 Структура поверхности в плане	-
7 Структура поверхностных слоев в сечении	-
8 Макрофотография изношенной поверхности	-
9 Вид износа	Ведущий абразивный, сопутствующий – окислительный

23.2 Задание

Составить паспорта изношенных деталей и установить ведущий вид износа.

23.3 Порядок выполнения работы

23.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

Образцы деталей, изношенных различными способами.

23.3.2 Проведение испытаний

23.3.1 Получить у преподавателя одну или две изношенные детали.

23.3.2 Составить паспорта и эскизы изношенных деталей.

23.3.3 Установить ведущий вид износа.

23.3.4 Выяснить особенности и механизм развития ведущего вида износа.

23.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о значении паспортизации деталей и узлов эксплуатируемых машин, эскизы и паспорта изношенных деталей

23.5 Контрольные вопросы

23.5.1 Для чего осуществляют классификацию видов изнашивания?

23.5.2 Как определить ведущий вид износа?

23.5.3 Какую основную цель преследует составление паспорта деталей и узлов?

23.5.4 Из каких разделов состоит паспорт деталей и узлов?

23.5.5 Какие вопросы рассматривают в каждом из разделов паспорта?

23.5.6 Что можно составить по материалам паспортизации?

24 Лабораторная работа № 9. Шероховатость поверхности и её измерение

Целью работы является ознакомление понятием шероховатость поверхности и конструкцией приборов для измерения шероховатости, изучить принцип их работы, приобрести практические навыки работы с профилометрами.

24.1 Общие сведения

24.1.1 Характеристики шероховатости

Шероховатость относится к микрогеометрии твёрдого тела и определяет его важнейшие эксплуатационные свойства. В машиностроении шероховатость поверхности – совокупность микронеровностей обработанной поверхности.

Шероховатость – совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности детали. Возникает главным образом вследствие пластической деформации поверхностного слоя заготовки при её обработке из-за неровностей режущих кромок инструмента, трения, вырывания частиц материала с поверхности заготовки, вибрации заготовки и инструмента и т.п.

Шероховатость поверхности – важный показатель в технической характеристике изделия, влияющий на эксплуатационные свойства деталей и узлов машин – износостойкость трущихся поверхностей, усталостную прочность, коррозионную устойчивость, сохранение натяга при неподвижных посадках и т.п. Требования к шероховатости поверхности устанавливают, исходя из функционального назначения поверхностей деталей и их конструктивных особенностей.

Шероховатость поверхности является одним из существенных факторов, определяющих технические и эксплуатационные свойства машин. Она оказывает влияние на трение, износ, усталостную прочность, сопротивление ударным нагрузкам, прочность прессовых соединений, антикоррозионную стойкость металлов и т.п., и в значительной степени определяет надёжность и долговечность работы машин.

Шероховатость поверхности – размерная характеристика поверхности. Количественно шероховатость можно оценить по тем или иным показателям. Шероховатость поверхности отображается профилограммой, её вид и характеристики показан на рисунке 24.1. В соответствии с ГОСТ 2789-73 предусмотрено шесть параметров, характеризующих шероховатости поверхности: три высотных – R_a , R_z и R_{max} ; два шаговых – S и S_K и относительная опорная длина профиля t .

Свойства поверхности определяются не только высотными характеристиками неровностей. Кроме шести рассмотренных параметров ГОСТ 2789-73 предусматривает использование еще двух характеристик – направление неровностей (шесть типов – параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное и радиальное) и вид обработки, дающий различный профили (рисунок 24.2), эксплуатационные свойства которых различны, хотя значения высотных параметров для них одинаковы.

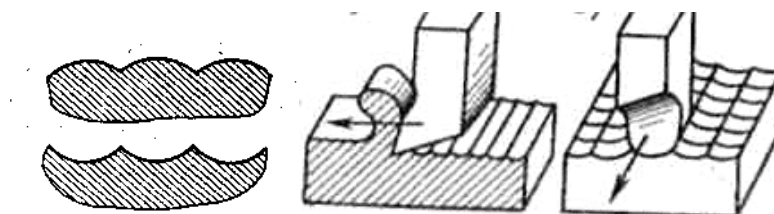


Рисунок 24.2 – Направление и профили поверхности с одинаковыми параметрами

Обозначения шероховатости поверхности на чертежах устанавливает ГОСТ 2.309-73 и указываются в ее обозначении (рисунок 24.3).

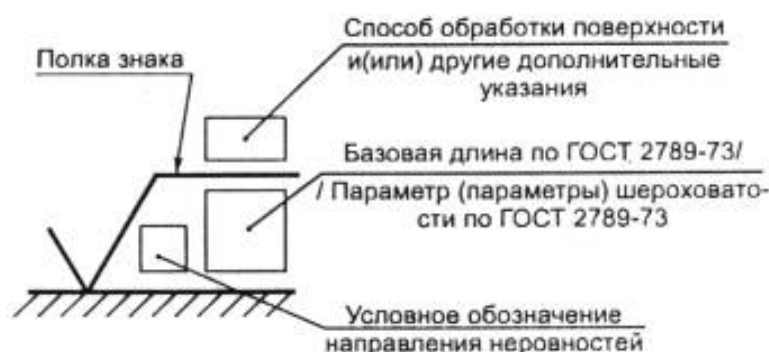


Рисунок 24.3 – Значения параметров шероховатости

Обработанные поверхности подразделяют на следующие группы:

- 1) черновые – R_a находится в диапазоне от 100 до 12,5 мкм (обтачивание, растачивание, фрезерование, строгание черновое, сверление, обработка напильниками);
- 2) получистовые – R_a находится в диапазоне от 12,5 до 1,6 мкм (точение, растачивание, фрезерование получистовое, зенкерование);
- 3) чистовые – R_a находится в диапазоне от 1,6 до 0,2 мкм (обтачивание, растачивание тонкое, шлифование, развертывание, протягивание);
- 4) весьма чистые – R_a находится в диапазоне от 0,2 до 0,06 мкм (шлифование чистовое, хонингование, притирка, полирование, суперфиниширование).

В соответствии с ГОСТ 2789-73 различают 14 классов (таблица 24.1) шероховатости.

Таблица 24.1 – Элементы классов шероховатости

Классы	Разряды	Параметры шероховатости, мкм		Базовая длина l , мм
		R_a	R_z	
1	–	–	320-160	8
2	–	–	160-80	
7	а	1,25-1,0	–	0,8
	б	1,0-0,80	–	
	в	0,80-0,63	–	
14	а	–	0,050-0,040	0,8
	б	–	0,040-0,032	
	в	–	0,032-0,025	

Шероховатость поверхности зависит от метода и режима обработки, качества применяемого режущего инструмента, жесткости технологической системы, физико-механических свойств обрабатываемого материала, вида применяемой смазывающе-охлаждающей жидкости, вибраций технологической системы и др.

1-3-й классы обеспечивают обдирочной обработкой (точением, фрезерованием, строганием);

4-6-й классы – полустрогальной обработкой;

7-9-й классы – чистовой обработкой (шлифованием, тонким точением, протягиванием, развертыванием и т.п.);

10-14-й классы – доводочной обработкой (притирка, суперфиниш, хонингование и др.).

Каждому методу обработки (точение, шлифование и др.) соответствует свой диапазон получаемой шероховатости поверхности. В таблице 24.2 приведена шероховатость поверхности при различных методах обработки стали и серого чугуна и сопоставлены параметры шероховатости с параметрами средней экономической точности.

Грубо обработанные поверхности более подвержены коррозии, особенно в атмосферных условиях, так как коррозия наиболее интенсивно протекает на дне микронеровностей и мелких надрезов.

Кроме шероховатости, качество поверхности характеризуется волнистостью и отклонением формы. Шероховатостью поверхности (микрогеометрией) называют совокупность неровностей с относительно малыми шагами на базовой длине, образующих рельеф поверхности детали. Волнистостью поверхности называют совокупность периодически чередующихся неровностей с относительно большим шагом, превышающим базовую длину, принимаемую при измерении шероховатости. На рисунке 24.4 приведено схематическое изображение шероховатости и волнистости поверхности.

Разграничением понятий шероховатости, волнистости и отклонением формы является отношение шага к высоте неровностей:

- для шероховатости $l/H < 50$;
- для волнистости L/H_B – от 50 до 1000;
- для отклонения формы $L/H_B > 1000$.

Таблица 24.2 – Шероховатость поверхности при различных методах обработки

Метод обработки	Квали- тет точ- ности	R_a , мкм	Метод обработки	Квали- тет точ- ности	R_a , мкм
Точение:			Прошивание (для коротких отверстий)	7	0,63–0,32
предварительное	12–13	12,5	Шлифование:		
чистовое	10–11	2,5–1,25	обдирочное*	–	2,5–1,25
тонкое, алмазное	6–7	0,63–0,32	предварительное	8–10	1,25–0,63
Фрезерование:			чистовое	7–8	0,63–0,32
предварительное	11–12	12,5	тонкое	6–7	0,32–0,08
чистовое	8–10	2,5–1,25	Хонингование от- верстий диаметром до 80 мм	6–7	0,32–0,08
тонкое (торцовыми фрезами)	6–7	0,63–0,32	Развертывание:		
Сверление	11–12	6,3–2,5	предварительное	8–9	2,5–1,25
Зенкерование:			чистовое	7	1,25–0,63
предварительное	12	2,5–12,5	тонкое	6–7	0,63–0,32
чистовое (после черно- вого)	11	6,3–2,5	Притирка (доводка)	5–6	меньше 0,1
Протягивание отверстий	7–8	1,25–0,63	Полирование **	–	0,032–0,012
* Обдирочное шлифование применяют в качестве предварительной обработки поверхностей отливок и поковок, не выдерживая допусков на размер.					
** Этот метод не повышает точности размера предшествующей обработки.					

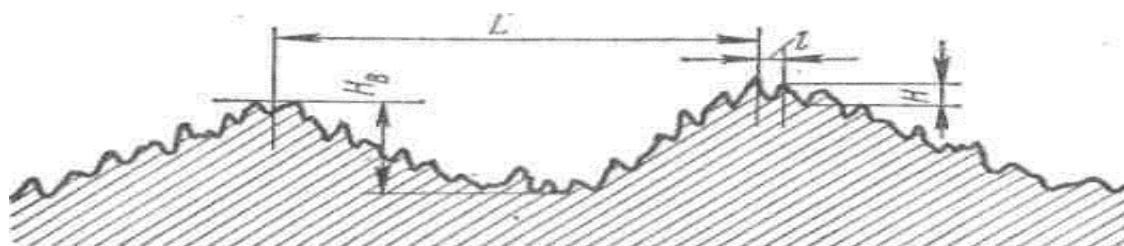


Рисунок 24.4 – Схематическое изображение шероховатости и волнистости поверхности

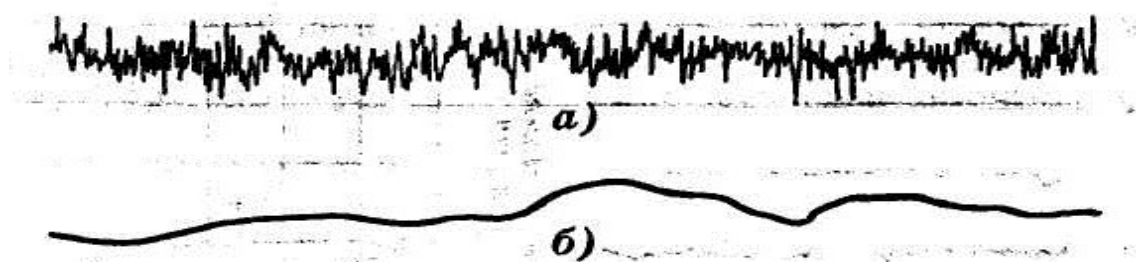
Шероховатость поверхности уменьшает площадь фактического касания двух сопрягаемых поверхностей, что ухудшает условия смазки. Следовательно, одним из существенных вопросов в изучении шероховатости поверхности является её правильная оценка, которую можно осуществить с помощью приборов.

24.1.2 Методы измерения и оценки качества поверхности

Шероховатость поверхности оценивают качественным методом, сопоставляя её визуально с эталонами шероховатости на токарные, шлифовальные и другие виды работ. Для количественного метода измерения шероховатости обработанной поверхности применяют различного вида приборы, основанные на использовании контактного (профилометры, профилографы) и бесконтактного (двойной микроскоп).

Профилометр (от профиль и ...метр) – прибор, определяющий размер неровностей обрабатываемой поверхности изделия. В профилометре сигнал от датчика с алмазной иглой, перемещаемого вдоль контролируемой поверхности. Профилометр с автоматической записью показаний на ленте называют профилографом.

Профилограммы обработанной поверхности, как правило, имеют вид острой пики; это является результатом того, что вертикальное увеличение во много раз больше горизонтального (например, 40 000 и 400 соответственно). Иногда создается представление, что при трении обработанные поверхности зацепляются как две пики своими зубцами. В действительности профиль поверхности выглядит иначе (рисунок 24.5).



а – вертикальное увеличение 40 000, горизонтальное увеличение 400;
б – действительный профиль поверхности при одинаковом вертикальном и горизонтальном увеличении.

Рисунок 24.5 – Профилограмма стальной поверхности после шлифования

Визуальная оценка поверхности невооруженным глазом возможна в пределах шероховатости, соответствующей $R_z = 320$ до 10 мкм. Применение микроскопа сравнения (модель М-49) расширяет возможности этого метода контроля. Оценка шероховатости поверхности методом сравнения субъективна и может вызвать разногласия.

Для непосредственных измерений высоты микронеровностей пользуются приборами: оптическими (двойной микроскоп, микроинтерферометр), щуповыми (профилометры, профилографы), пневматическими, лазерными.

24.1.3 Устройство и принцип работы профилометров

24.1.3.1 Устройство и принцип работы лазерного профилометра

Лазерный профилометр применяют для исследования рельефа местности, например, высотометр на гелий-неоновом лазере непрерывного излучения устанавливают на самолете. Длина оптического резонатора лазера равна 150 см. Лазер излучает на волне 0,6328 мкм, средняя мощность излучения 50 мВт. Вес высотометра в целом 80 кг, причем большая часть веса приходится на различные крепления, обеспечивающие стабильное положение высотометра на самолете.

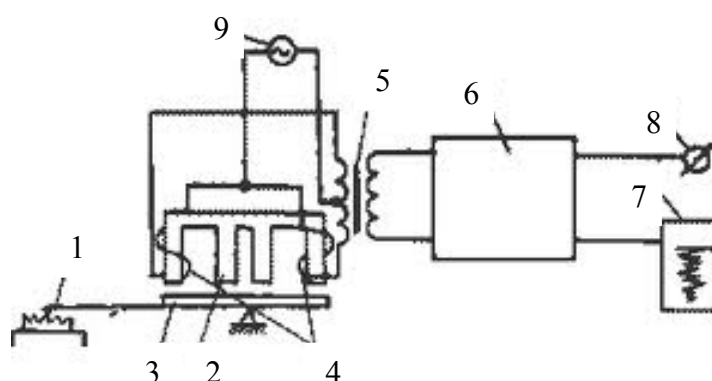
Излучаемый лазером луч модулируется с помощью кристаллов КДР радиочастотными колебаниями. Модуляция в зависимости от выбранного диапазона высот осуществляется тремя различными частотами (25, 5 и 1 МГц). Режим модуляции (диа-

пазон высот) выбирается с помощью переключателя. Луч лазера просматривает земную поверхность под самолетом. Отраженное от земли лазерное излучение попадает на зеркало Ø152 см рефракционного телескопа, расположенное коаксиально с оптикой передатчика, затем проходит интерференционный фильтр, селектор поля зрения и попадает на светочувствительную поверхность фотоумножителя.

24.1.3.2 Устройство и принцип работы профилографа-профилометра модели 201

Профилограф-профилометр модели 201 предназначен для измерения шероховатости по параметру R_a для классов шероховатости поверхности от 6 до 12, т.е. среднее арифметическое отклонение профиля, R_a , может составлять от 2,5 до 0,03 мкм.

Блок-схема профилографа-профилометра показана на рисунке 24.6.

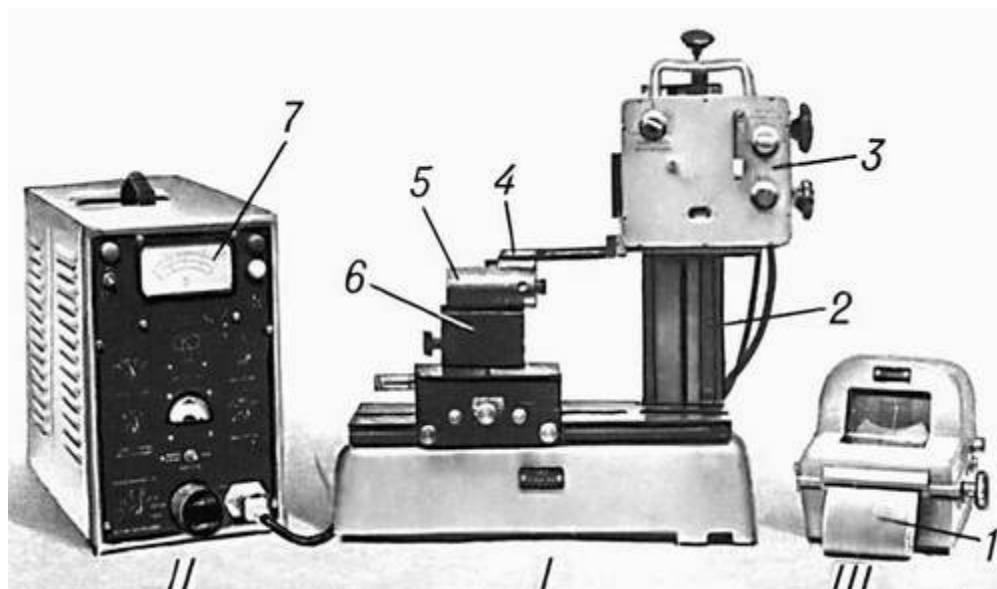


1 – алмазная игла; 2 – воздушный зазор; 3 – якорь; 4 – сердечник и катушка преобразователя; 5 – дифференциальный трансформатор; 6 – электронный блок; 7 – записывающий прибор; 8 – показывающий прибор; 9 – генератора звуковой частоты.

Рисунок 24.6 – Блок-схема профилографа-профилометра

В основу работы профилографа-профилометра положена мостовая схема индукционных катушек дифференциального трансформатора. При перемещении измерительного устройства прибора (с помощью индивидуального привода смонтированного в корпусе преобразователя) поперечные колебания алмазной иглы 1 вызывают изменение воздушного зазора 2 между якорем 3 и сердечником преобразователя 4. Вследствие этого изменяется напряжение на выходе дифференциального трансформатора 5, две части первичной обмотки которого и катушки преобразователя 4 образуют мост. Питание балансного моста осуществляется от генератора звуковой частоты 9. Изменения напряжения усиливаются электронным блоком 6, на выходе которого подключаются записывающий 7 или показывающий 8 приборы.

Прибор состоит из самостоятельно выполненных блоков I, II, III (рисунок 24.7).



1 – профилограмма; 2 – стойка; 3 – привод; 4 – датчик; 5 – деталь;
6 – измерительный столик; 7 – показывающее устройство электронного блока.

Рисунок 24.7 – Общий вид профилографа-профилометра модели 202 для определения высот неравномерностей от 0,03 до 80 мкм на трассе ощупывания до 36 мкм

На столе стойки 2 крепится столик 6, позволяющий перемещать испытуемую деталь в двух взаимоперпендикулярных направлениях и осуществлять поворот её. Мотопривод 3 с жестко закрепленным на нем датчиком 4 перемещается по стойке с помощью рейки и шестерни. Кроме того, в состав прибора входят электронный блок с показывающим прибором 7 и записывающий прибор 1. Основой датчика 4 является алмазная игла, расположенная на конце коромысла, качающегося на ножевой опоре, что создает дисбаланс мостовой схемы. Полученный электрический сигнал проходит через усилитель электронного блока 7 и подается на показывающее или записывающее устройство. Привод 3 предназначен для перемещения датчика 4 по исследуемому образцу 5. В зависимости от рода работы прибора и исследуемого образца используют одну из четырех скоростей перемещения датчика (0,2; 1,0; 10 и 0,7 мм/с) и одну из трёх длин участков измерения (6; 3,2; 1,6 мм).

В качестве показывающего прибора используют микроамперметр постоянного тока. Отсчет показаний прибора осуществляется по неподвижной стрелке, останавливающейся автоматически в конце хода датчика. Записывающий прибор представляет собой самопишущий магнитоэлектрический миллиамперметр постоянного тока. Запись производится электротермическим способом на специальной диаграммной бумаге в прямоугольной системе координат с восемью ступенями увеличения по вертикали (от 1000 до 200000 крат), при 18 горизонтальных увеличениях (от 2 до 4000 крат).

Порядок работы с прибором в режиме профилографа следующий:

- 1) установить испытуемую деталь на основании прибора в приспособление;
- 2) установить датчик на испытуемую поверхность, причем датчик устанавливают горизонтально. Проверка горизонтальности обеспечивает вращением маховиков на приводе и проверяется положением стрелки контрольного прибора (должна

находиться в участке нижнего прямоугольника), причем перо записывающего прибора должно находиться посередине бумажной ленты. Тумблер включения электронного прибора должен находиться в положении «выход усилителя»;

3) установить требуемое вертикальное увеличение, скорость трассирования и скорость перемещения бумаги, которая обеспечивает желаемое горизонтальное увеличение;

4) переключатель режима работы установить в положение «ЗП» – записывающий прибор;

5) включить движение бумаги;

6) включить движение датчика;

7) после окончания измерения переключатель режима работы установить в положение «ЗАГР» – загрубленно и выключить движение бумаги.

Оценку шероховатости рассматриваемой поверхности производят в основном по численному значению параметра R_a , представляющее среднеарифметическое отклонение профиля исследуемой поверхности от средней линии. На профилограмме выделяют участок трассирования и на нем рассчитывают величину шероховатости R_a , но предварительно устанавливают и проверяют горизонтальное и вертикальное увеличение.

В зависимости от скорости датчика и скорости бумаги записывающего прибора устанавливают требуемое увеличение, причем эта величина есть частное от деления скорости перемещения бумаги записывающего прибора на скорость перемещения датчика. Значение горизонтального увеличения задают исходя из таблицы 24.3.

Таблица 24.3 – Горизонтальное увеличение профилографа

Скорость датчика, мм/мин	Скорость бумаги записывающего прибора, мм/мин					
	20	40	80	200	400	800
0,2	100	200	400	1000	2000	4000
1,0	20	40	80	200	400	800
10,0	2	4	8	20	40	80

Проверка горизонтального увеличения при записи производится сравнением длины трассы датчика с длиной профилограммы, снятой при этой трассе.

Требуемое вертикальное увеличение профилограммы задают с помощью переключателя. Проверка вертикального увеличения производится с помощью оптического стекла следующим образом.

На оптическом стекле протираются рядом две концевые меры, создающие ступеньку, величина которой должна быть точно аттестована. Аттестация производится вблизи граней, которыми плитки соприкасаются. Погрешность аттестации рисок не должна превышать 3 % от величины ступеньки.

Для проверки различных ступеней увеличения желательно иметь несколько блоков плиток с разницей размеров между плитками порядка 0,35 мкм, 5 мкм и 30 мкм.

Датчик устанавливают на большую концевую меру так, чтобы игла находилась вблизи стыка концевых мер. Перо записывающего прибора устанавливается с левого края бумаги. После установки переключателя в положение, соответствующее проверяемому вертикальному увеличению, включается движение датчика со скоро-

стью 0,2 мм/мин для увеличений: 200000, 100000 и 40000 и 1 мм/мин для – 20000, 10000, 4000, 2000 и 1000 и производится запись профилограммы (величина горизонтального увеличения не регламентируется). При движении датчика игла переходит с большей концевой меры на меньшую, а опора датчика остается на большей. Такой переход на профилограмме выражается в смещении средней линии профиля на определённую величину.

Отношение величины смещения средней линии профиля на профилограмме к величине ступеньки между концевыми мерами есть фактическое вертикальное увеличение профилографа. При отклонении фактического вертикального увеличения от номинального на всех ступенях в одну и ту же сторону следует поворотом винта и регулировки вертикального увеличения отрегулировать увеличение. Во избежание выбрасывания пера следует в момент перехода иглы с большей концевой меры на меньшую перевести переключатель в положение «ЗАГР».

Порядок работы с прибором в режиме профилометра следующий:

- 1) установить деталь на основании или в приспособлении;
- 2) установить требуемый предел измерения от 8 до 0,08 мкм и режим работы на приводе «ПП» – показывающий прибор;
- 3) перевести датчик в левое положение рычагом до упора (стрелка показывающего прибора должна вернуться на «0»);
- 4) установить датчик на исследуемую поверхность вертикальным перемещением привода с датчиком (выводится стрелкой контрольного прибора и она должна находиться в участке нижнего прямоугольника);
- 5) переключатель скорости установить на «ПП» при этом автоматически включается скорость 0,7 мм/с;
- 6) установить длину трассы интегрирования (1,6; 3,2 или 6 мм);
- 7) установить режим работы на усилителе ПП (показывающий прибор) и соответствие длин трасс интегрирования;
- 8) установить необходимую базовую длину – отсечка шага (0,08; 0,25; 0,8 или 2,5 мм);
- 9) нижним маховиком зафиксировать положение каретки с мотоприводом на стойке;
- 10) включить движение датчика большим рычагом на приводе вправо до упора. После остановки стрелки произвести отсчет значения шероховатости на показывающем приборе.

После окончания измерений переключатель режима работы установить в положение «ЗАГР» – загружено. В этом положении должен и находиться прибор при всех операциях по установке образца и подготовке к измерению или записи.

Для определения классов и разрядов на шкале нанесены зоны, обозначающие класс, в котором находятся полученные значения шероховатости измеряемой поверхности.

Например, если переключатель диапазонов измерения установлен в положение «7кл», а стрелка находится в положении 1 (рисунок 24.8), то при определении класса нужно пользоваться зоной, условное обозначение которой находится под цифрой «7» в левой нерабочей части шкалы.

Таким образом, для определения класса шероховатости измеряемой поверхности необходимо в левой нерабочей части шкалы найти обозначение зоны, соответствующее положению переключателя режимов работы. Если стрелка находится в пределах этой зоны, то класс шероховатости поверхности измеряемой детали соот-

ветствует установленному переключателем классу. Если стрелка остановится левее этой зоны, то это будет соответствовать более высокому классу, если правее зоны – более низкому классу.

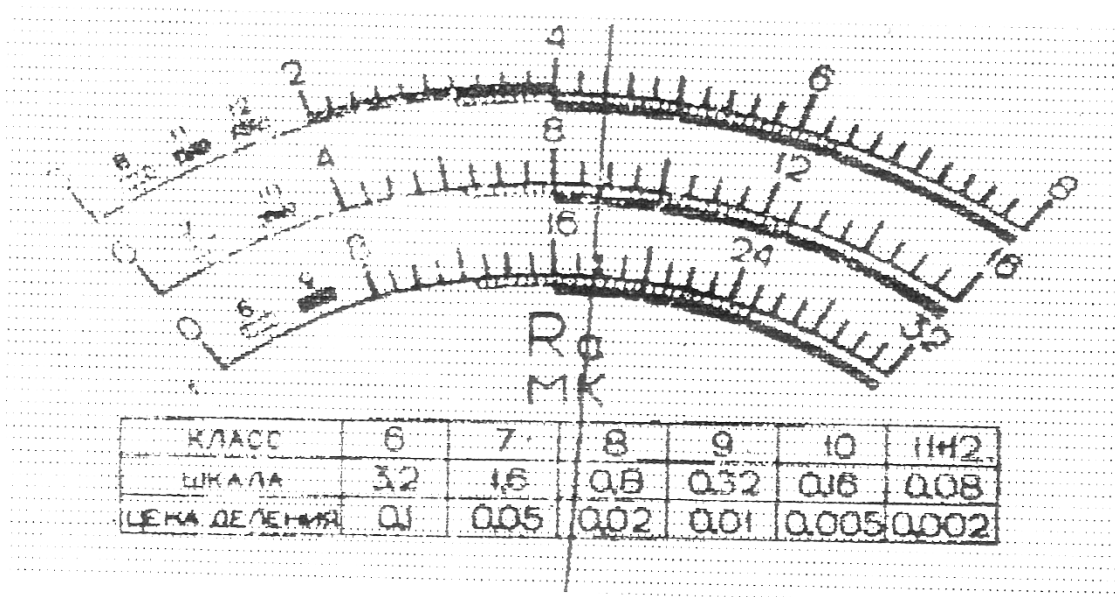
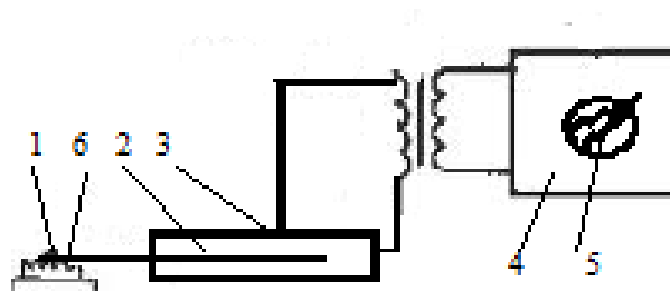


Рисунок 24.8 – Показание прибора

Отсчет числовых значений производят в соответствии с положением переключателя и ценой деления шкалы, приведенной в таблице (рисунок 24.8).

27.1.3.3 Устройство и принцип работы профилометра модели 253

В основу работы данного прибора также положен принцип ощупывания алмазной иглой датчика исследуемой поверхности и преобразования колебаний иглы в изменения напряжения при помощи механотронного преобразователя. На рисунке 24.9 показана блок – схема портативного профилометра.

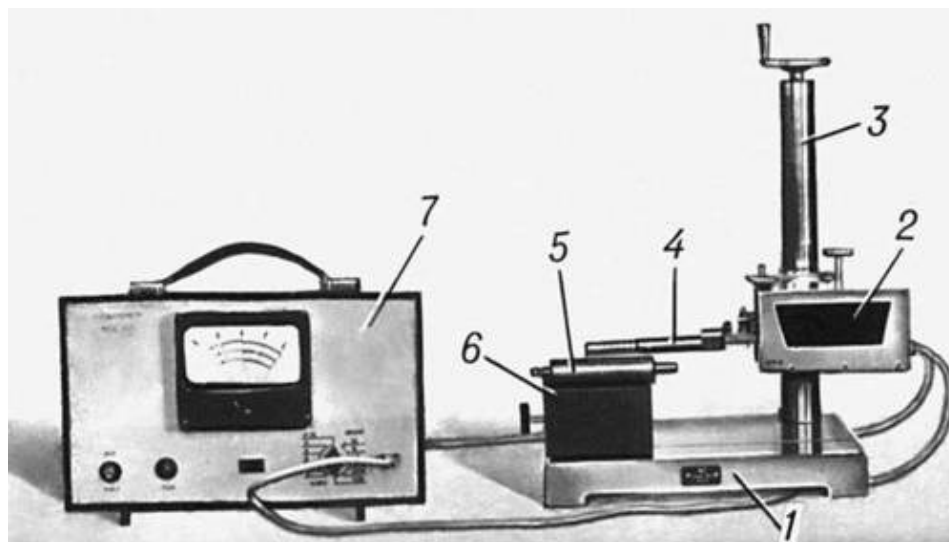


- 1 – алмазная игла; 2 – механотрон; 3 – привод; 4 – усилитель;
5 – показывающий прибор; 6 – исследуемая поверхность.

Рисунок 24.9 – Блок-схема портативного профилометра

Алмазная игла 1 с помощью привода 3 перемещается по исследуемой поверхности 6. При этом механические колебания иглы с помощью механотрона 2 преобразуются в электрические сигналы, которые, пройдя через усилитель 4, подают на показывающий прибор 5.

Общий вид портативного профилометра представлен на рисунке 24.10.



1 – станина; 2 – привод; 3 – стойка; 4 – датчик; 5 – деталь; 6 – измерительный столик; 7 – электронный блок с показывающим устройством.

Рисунок 24.10 – Общий вид портативного профилометра модели 253

В приводе 2 крепится датчик 4 с алмазной иглой. Датчик представляет собой механически управляемую электронную лампу (механотрон), подвижный анод которой посредством тонкой мембраны связан со щупом, на котором укреплена алмазная игла, производящая «ощупывание» исследуемой поверхности.

Для перемещения датчика по исследуемой поверхности с постоянной скоростью используют привод 2. После пуска прибора привод осуществляет возвратно-поступательное перемещение датчика на пути интегрирования 3,2 мм, при этом скорость трассирования датчика равна 0,62 мм/с.

Порядок работы на портативном профилометре следующий:

1) установить прибор на рабочее место и подготовить его к работе (включить в сеть, вставить датчик, соединить привод с электронным блоком, привод с датчиком устанавливают исходя из условий удобства измерения (на столе, на стойке, на детали));

2) опустить датчик рукояткой на измеряемую деталь, установить корпус параллельно измеряемой поверхности;

3) установить переключатель диапазонов на электронном блоке в положение предполагаемого класса шероховатости измеряемой поверхности;

4) нажать кнопку «Пуск» на электронном блоке. Датчик проходит от 5 до 6 мм (предварительный ход, после реверсирования датчик возвращается в исходное положение (рабочий ход), стрелка показывающего прибора показывает величину ше-

роховатости). После остановки стрелки производят отсчет по шкале, если стрелка уходит за пределы шкалы, то следует изменить положение переключателя диапазонов измерения. Шкала показывающего прибора градуирована в микрометрах по параметру Ra. Отсчет производят по показанию прибора с учетом положения переключателя диапазонов измерения;

5) для определения класса шероховатости измеряемой поверхности необходимо в левой нерабочей части шкалы найти обозначение зоны, соответствующее положению переключателя. Если стрелка находится в пределах этой зоны, то класс шероховатости поверхности измеряемой детали соответствует установленному переключателем классу. В том случае, если стрелка остановится левее этой зоны, то это будет соответствовать более высокому классу, если правее зоны – более низкому классу.

24.1.3.4 Устройство и принцип работы профилометра модели TR100

Из серии приборов нового поколения для измерения шероховатости поверхности рассмотрим измеритель шероховатости TR 100 – портативный прибор, разработанный TIME Group Inc. (рисунок 24.11), имеет высокую точность, широкий диапазон применения, прост и надежен в эксплуатации.



1 – кнопка запуска измерения; 2 – экран; 3 – кнопка выбора измеряемого параметра;
4 – кнопка выбора диапазона измерений; 5 – датчик.

Рисунок 24.11 – Измеритель шероховатости TR 100

Его применяют для измерения шероховатости поверхностей всех видов металлов и неметаллов в шкалах R_a и R_z . Объединение в одном корпусе датчика с центральным процессором делает портативный профилометр TR 100 особенно подходящим для использования на производственных участках и в цехах. Действие профилометра TR 100, как и ранее рассмотренных профилометров основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой щупа и преобразования, возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям. Профилометр TR 100 снабжен современным микропроцессором для сбора и обработки данных с отображением всех результатов измерений. В измерителе шероховатости TR 100 результаты измерения параметров шероховатости выводятся на жидкокристаллический дисплей.

Измеритель шероховатости TR 100 соответствует требованиям стандартов ISO (Международная организация по стандартизации) и др. и его технические характеристики приведены в таблице 24.4.

Таблица 24.4 – Технические характеристики измерителя шероховатости TR 100

Параметры	Величина
Измеряемые параметры шероховатости	R_a, R_z
Длина трассы сканирования, мм.	6
Скорость перемещения щупа, мм/с	1.0
Значения отсечек шага, мм	0,25 / 0.8 / 2,5
Длина оценки значений параметров шероховатости, мм	1.25 / 4.0 / 5.0
Диапазон измерений по параметрам, мкм	$R_a: 0.05 - 10.0$ $R_z: 0.1 - 50$
Повторяемость результатов измерений, %	< 12.
Тип датчика	пьезоэлектрический
Диапазон рабочих температур, °C	от 0 до 40
Относительная влажность воздуха, %	< 80
Степень точности	класс 3
Электрическое питание 2 никель-металлогидридных аккумулятора, В	3,6
Зарядное устройство	9 В постоянного тока
Время перезарядки, ч	10 – 15
Габаритные размеры, мм	125×73×26
Масса электронного блока, г	200

Перед началом измерения необходимо выбрать параметр шероховатости поверхности (R_a или R_z) и необходимую длину сканирования (0,25, 0,8 или 2,5 мм). Для калибровки прибора используют стандартный образец со значением R_a от 2 до 4,5 мкм.

24.2 Задание

Ознакомиться с конструкцией приборов для измерения шероховатости поверхности (профилометрами). Изучить устройство и принцип работы приборов. Произвести измерения шероховатости поверхности R_a стандартного и обработанных образцов.

24.3 Порядок выполнения работы

24.3.1 Пользуясь методическими указаниями и технической документацией, разобраться в конструкции и уяснить принцип действия профилографа-профилометра, портативного профилометра и измерителя шероховатости TR 100.

24.3.2 Настроить профилограф модели 253 и произвести проверку показаний с эталонным образцом. Произвести съемку профилограммы поверхности образца. По полученной профилограмме определить значение параметра R_a .

24.3.3 Провести измерение шероховатости предложенного образца.

24.3.4 Провести измерение шероховатости эталонного образца с помощью профилометра TR100.

24.3.5 Провести измерение шероховатости предложенного образца с помощью профилометра TR100.

24.3.6 Повторить измерения по 3 раза и оценить воспроизводимость показаний.

24.3.7 Сравнить результаты измерений, полученные на различных приборах и сделать вывод о точности измерения.

24.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткое описание сущности измерения шероховатости с помощью профилографа и профилометра, результаты экспериментальной работы, выводы.

24.5 Контрольные вопросы

24.5.1 Какие параметры используют для оценки шероховатости поверхности?

24.5.2 Как определяется средняя линия профиля на профилограмме?

24.5.3 Как определяется наибольшая высота неровностей профиля R_{max} ?

24.5.4 Опишите принцип работы профилометра модели 253.

24.5.5 Опишите принцип работы профилографа-профилометра модели 201.

24.5.6 Опишите принцип работы измерителя шероховатости TR 100.

Список использованных источников

- 1 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, Э. Д. Браун ; отв. ред. И. М. Федорченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук. думка, 1990. – 264 с. – ISBN5-12-001395-3.
- 2 Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1992. – 730 с. – ISBN 5-217-01919-0.
- 3 Икрамов, У. А. Основы трибоники : учеб. пособие для вузов / У. А. Икрамов, М. А. Левин. – Ташкент : Укитувчи, 1984. – 184 с.
- 4 Справочник по конструкционным материалам : справочник / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьёвой. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с. – ISBN5-7038-2651-9.
- 5 Комбалов, В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов : справочник / В. С. Комбалов; под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. – Москва : Машиностроение, 2008. – 384 с. – ISBN 978-5-217-03370-6.
- 6 Методы испытаний на трение и износ : справочное изд./ Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова.– Москва :Интермет инжиниринг, 2001. – 152 с. – ISBN5-89594-059-5.
- 7 Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) : учебник для вузов / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
- 8 Гаркунов, Д. Н. Триботехника : учебник для вузов / Д. Н. Гаркунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
- 9 Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для вузов / Э. Д. Браун [и др.] ; под ред. А.В.Чичинадзе. – М. : Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
- 10 Крагельский, И. В. Основы расчётов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
- 11 Мур, Д. Ф. Основы и применения трибоники / Д. Ф. Мур. – М. : Мир, 1978. – 487 с.
- 12 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с. . – ISBN 5-217-03193-X.