

**Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации**

**Технологический институт-филиал ФГБОУ ВО
Ульяновский ГАУ**

С.Н. Петряков
Н.П. Аюгин

ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ
(учебное пособие)



Димитровград - 2019

УДК 621.89

ББК 39.3

П - 31

Петряков, С.Н. Основы триботехники / С.Н. Петряков, Н.П. Аюгин - Димитровград: Технологический институт – филиал УлГАУ, 2019.- 188 с.

Рецензенты: Глущенко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ротанов Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные и технические дисциплины», ПКИУПТ (филиал) ФГБОУ ВО «МГУТУ ИМ. К.Г.РАЗУМОВСКОГО (ПКУ)»

В учебном пособии в краткой форме рассматриваются основные вопросы дисциплины «Триботехника». Учебное пособие позволяет получить основные знания по предмету и более качественно подготовиться к итоговому контролю. Представленные материалы помогут студентам лучше усвоить, систематизировать и закрепить пройденный материал, приобрести умения и навыки по испытанию машин. Учебное пособие включает теоретический курс, лабораторно – практические занятия, контрольные тесты. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»

Утверждено
на заседании кафедры «Эксплуатация
транспортно-технологических машин и комплексов»
Технологического института – филиала
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,
протокол № 1 от 4 сентября 2019г.

Рекомендовано
к изданию методическим советом Тех-
нологического института – филиала
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ
Протокол № 2 от 10 октября 2019г.

© С.Н. Петряков, Н.П. Аюгин, 2019

© Технологический институт – филиал ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,
2019

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ	5
1. Общее представление о дисциплине. Термины и определения	5
2. Макро- и микрогеометрия поверхности деталей	11
3. Трение без смазочного материала и в граничной смазке	18
4. Жидкостное трение и трение качения	32
5. Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания пары трения	40
6. Абразивное изнашивание	47
7. Водородное изнашивание	54
8. Окислительное изнашивание	61
9. Фреттинг-коррозия, адгезионное и усталостное изнашивание	68
10. Смазочные материалы, применяемые в парах трения	76
11. Конструктивные материалы, применяемые в парах трения	86
12. Конструктивные методы повышения износостойкости	94
13. Технологические методы повышения износостойкости	101
14. Эксплуатационные методы повышения износостойкости	109
2 ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ	117
1. Определение износа материалов при триботехнических испытаниях	117
2. Изучение микрогеометрии поверхности	128
3. Изучение изменений микрогеометрии в процессе контактного взаимодействия и ее влияния на параметры трения	140
4. Изучение влияния различных режимов нагружения и материалов на коэффициент трения твердых тел	144
5. Сравнение триботехнической эффективности	

различных смазочных масел и присадок	150
6. Изучение влияния вида трения на износостойкость твердых тел	154
3. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ	159
4. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ПЕРСОНАЛИЙ	166
ЛИТЕРАТУРА.....	175
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	177

1 КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

1. Общее представление о дисциплине. Термины и определения.

- 1) Введение, основные положения дисциплины.**
- 2) Структура и физико-механические свойства поверхностного слоя.**
- 3) Экономические потери от трения.**

Введение, основные положения дисциплины

В последние десятилетия широкое развитие получило научно - практическое направление, связанное с трибологией и триботехникой.

Современная наука трибология изучает трение, износ, смазку в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении. Она охватывает теоретические и экспериментальные исследования физических, химических, биологических и др. явлений, связанных с трением.

Главные задачи трибологии: изучение взаимодействий поверхностных слоев твердых тел в различных условиях; создание новых эффективных триботехнических материалов для подбора пар трения с целью сознательного управления фрикционным поведением материалов.

Триботехника - наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазывания машин. Другими словами - это наука о практическом применении знаний трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации трибологических систем для обеспечения требуемого качества на всем их жизненном цикле при наименьших затратах живого и овеществленного труда.

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

На трение расходуется 30...40 % всей вырабатываемой в

мире энергии, а потери средств в промышленности развитых стран вследствие трения и сопутствующего износа машин и механизмов составляют 4...5 % и более процентов национального дохода. Большинство машин (85...90 %) выходят из строя по причине износа деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в 6 раз; самолетов до 5 раз; металлорежущих станков до 8 раз.

На ремонт тракторов задействовано в 4 раза больше производственных мощностей, чем на их изготовление.

К общим понятиям триботехники относятся термины.

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

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

Износ - результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.

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

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

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

Смазывание - подведение смазочного материала к поверхности трения.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Поверхность трения - поверхность тела, участвующая в трении.

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

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

Структура и физико-механические свойства поверхностного слоя

В технике под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренних слоев.

Структура поверхностного слоя детали после механической обработки или внешнего трения одной детали относительно

второй может быть представлена в виде пяти слоев (рисунок 1).

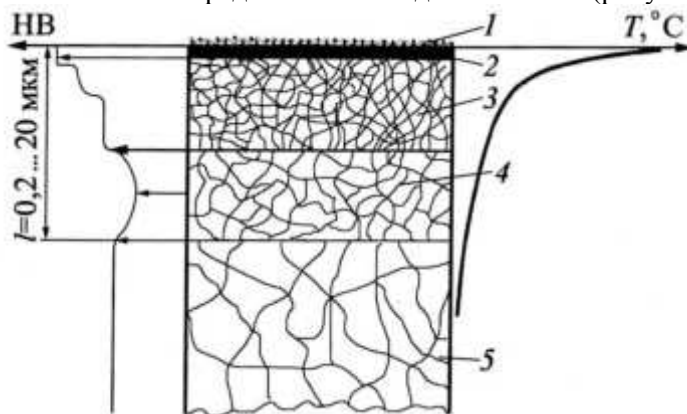


Рисунок 1 – Структура поверхностного слоя металла детали:
1 - адсорбированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений (0,01...0,1 мкм); 2 - слой оксида, имеющий повышенную твердость; 3 - слой с сильно деформированной кристаллической решеткой в результате наклепа; 4 - более глубокий слой с искаженной кристаллической решеткой и большим числом вакансий и дислокаций; 5 - металл с исходной структурой

Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуется обобщенным понятием «качество поверхности».

Качество поверхности определяется геометрией поверхности как границей тела и физико-химическими свойствами, обусловленными процессом ее образования при обработке детали. Качество поверхности деталей машин влияет на сопротивление усталости, износостойкость, коррозионную и эрозионную стойкость и связано с такими свойствами сопряжений, как прочность, посадок с натягом и плотность подвижных и неподвижных соединений.

Экономические потери от трения

Выход из строя деталей и рабочих органов машин при нормальных условиях эксплуатации редко являются следствием

их недостаточной прочности или чрезмерной ползучести материалов. Наиболее распространенной причиной выхода деталей и рабочих органов машин из строя является не поломка, а износ или повреждение рабочих поверхностей.

Одной из главных причин отказов является износ подвижных сопряжений машин - трибосопряжений. Хотя относительные величины износа, например отношение потери массы машины к ее первоначальной массе, иногда весьма малы, износ приводит к выходу из строя всего дорогостоящего изделия. Легковой автомобиль, например, имеет в среднем массу, равную 1000 кг. Если потеря его массы, вследствие износа трибосопряжений, ставит 1 кг, то он уже не подлежит ремонту.

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин-орудий, которые эксплуатируются в абразивных и агрессивных средах. Для дробилок массой 6 т при дроблении высокоабразивных пород расходуется в год 17 т дробящих плит. Дизели, установленные на карьерных самосвалах, требуют капитального ремонта после 1500...2000 ч работы. Бортовые шестерни тракторов работают до замены не более 2000...2500 ч. За сезон работы тракторов на песчаных почвах приходится заменять 2...3 комплекта гусениц (это 50 % стоимости нового трактора), лемех тракторного плуга в среднем обрабатывает до полного износа 15.. .20 га почвы.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в несколько раз превышают их стоимость, например, автомобилей в 6 раз, самолетов до 5 раз, станков до 8 раз, горных машин в 15 раз.

Объем трудовых затрат за срок службы автомобиля распределяется так: 1,4 % - изготовление, 45,4 % - техобслуживание, 46 % - текущий ремонт, 7,2 % - капремонт. Более 50 % трудовых затрат уходит на ремонт.

Обычно последствия износа машин и механизмов в результате изнашивания их рабочих деталей проявляются двояко. Первое - это снижение технико-экономических показателей машин по мере износа их деталей (мощности, производительности, КПД, расхода топлива, электроэнергии и т.п.). Второе - затраты на проведение ремонтных работ по устранению последствий износа рабочих деталей (затраты труда, материалов, запчастей, энергии и т.д.). На

практике чаще учитывают только второе. В то же время ухудшение технико-экономических показателей машин в эксплуатации вследствие износа их рабочих деталей обходится народному хозяйству гораздо дороже.

Еще одна проблема состоит в том, что при работе машин значительная часть подводимой энергии бесполезно расходуется на трение. Так, при работе металлообрабатывающего станка только 70 % энергии расходуется полезно, ткацкого - всего 20 %, а остальные 30 и 80 % теряются на трение и износ.

Контрольные вопросы

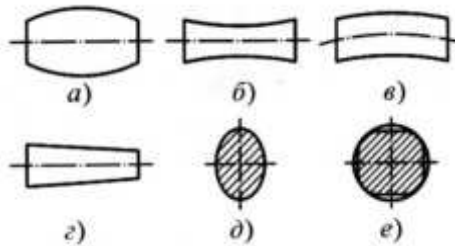
1. Каковы задачи трибологии?
2. Что такое сила трения?
3. Что такое изнашивание?
4. Что понимают под определением коэффициент трения?
5. Какова структура поверхностного слоя материала детали?
6. Каковы потери от трения и изнашивание деталей машин?

2. Макро- и микрогеометрия поверхности деталей.

- 1) Макрогеометрия поверхности деталей.
- 2) Микрогеометрия поверхности деталей.
- 3) Методы оценки микрогеометрии деталей.
- 4) Роль смазки в трибосопряжении.

Макрогеометрия поверхности деталей

Геометрическая форма, взаимное расположение поверхностей и размеры деталей машин обычно задаются чертежом и техническими условиями. Искажение геометрической формы или макроотклонение детали при ее изготовлении или эксплуатации приводит к повышенному и неравномерному изнашиванию деталей, снижает точность работы подвижных соединений, искажает характер посадок, вызывает контактное трение, а также создает очаги задиров и неравномерное распределение напряжений в посадках с натягом. На практике чаще всего встречаются формы отклонения цилиндрических поверхностей в продольном направлении, показанные на рисунке 2, а-г, а в поперечном направлении - на рисунке 2, д-е.



а - выпуклость; б - седлообразность; в - вогнутость;
г - конусность; д - овальность; е - огранка

Рисунок 2 –Виды отклонений форм цилиндрических поверхностей

Технические требования к форме детали возрастают по мере повышения качества машин, их надежности и долговечности.

Непрерывное совершенствование измерительных средств открывает возможность для установления аналитических и экспериментальных зависимостей между отклонениями формы и эксплуатационными свойствами сопрягаемых деталей. Это также позволяет повышать уровень существующих стандартов и совершенствовать их, учитывая не только технологию обработки и метрологию, но также выполнение деталию ее функций в машине, требования к ее надежности и износостойкости.

Микрогеометрия поверхности деталей

Поверхность деталей машин в технике оценивается качеством поверхности. В свою очередь, качество поверхности определяется физико-механическими свойствами и ее микрогеометрией.

Микрогеометрия создается в процессе изготовления деталей. Она характеризуется волнистостью и шероховатостью.

Шероховатость поверхности это размерная характеристика микронеровностей. При обработке деталей на обрабатываемой поверхности образуются мелкие неровности, выступы, впадины. Эти неровности имеют очень малые размеры, измеряемые при шлифовании десятymi и сотыми долями микрометра. Высота шероховатостей влияет на эксплуатационные качества сопрягаемых деталей. В ГОСТ 278973 для оценки шероховатости приняты следующие основные параметры (рисунок 3).



Рисунок 3 - Основные параметры для оценки шероховатости по ГОСТ 2789—73

Высота неровностей профиля по десяти точкам Rz — сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины.

Высота неровностей профиля по десяти точкам Rz

$$\hat{Rz} = \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}| \right) / 5,$$

где y_{pmi} - высота i -го наибольшего выступа профиля;

y_{vmi} - глубина i -й наибольшей впадины профиля.

Средний шаг неровностей профиля S_m — среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.

R_{max} - наибольшая высота профиля. Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Средний шаг местных выступов профиля S - среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины.

Опорная длина профиля η_p - сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемая на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии.

Относительная опорная длина профиля t_p - отношение опорной длины профиля к базовой длине.

Волнистость поверхности - это ряд повторяющихся возвышений и впадин с относительно большим шагом. В отличие от шероховатости поверхности волнистость характеризуется неровностями, имеющими значительно больший шаг, чем неровности, образующие шероховатость. По высоте шероховатость и волнистость оказываются близкими. Границу между шероховатостью, волнистостью и погрешностями формы можно установить по значению отношения шага к высоте неровностей. Отклонения, у которых отношение $l/R < 50$, относят к шероховатости, при $1000 \geq l/R \geq 50$ - к волнистости и при $l/R > 1000$ - к отклонениям формы.

Волнистость - периодически возникающие неровности геометрической структуры поверхности, вызываемые непредусмотренными колебаниями или подобными на

колебание относительными движениями в системе машина - инструмент - деталь. Волнистость определяется на вертикальном сечении поверхности, причем шероховатость и отклонение формы не учитываются. Длина участка измерений волнистости должна составлять, по крайней мере, пятикратное значение максимального возникающего шага волнистости. Высота волнистости - арифметическое среднее значение из пяти значений высоты волнистости, определяемых в пределах пяти равновеликих отдельных участков измерения волнистости как вертикальные расстояния между эквидистантами к средней линии, касающимися измеренного профиля волнистости каждый раз в наивысшей и наименьших точках.

Методы оценки микрогеометрии деталей

Для измерения шероховатости применяется целый ряд различных методов. Однако многие методы оценивают микрогеометрию поверхности только по ее профилю. Наиболее широко используются щуповой и оптические методы.

Оптический метод основан на использовании светового сечения, когда на исследуемую поверхность проектируется под углом 45° узкая ярко освещенная щель. Так как поверхность имеет неровности, то проекция воспроизводит форму профиля. Этот профиль может быть измерен с помощью микроскопа и сфотографирован.

Щуповой метод состоит в том, что по шероховатой поверхности перемещается игла 1 (рисунок 4) с малым радиусом закругления 2... 10 мкм. Игла соединена с якорем 2 и может вместе с ним поворачиваться относительно призмы 4, при этом меняется зазор между сердечником 3 и якорем 2.

Это приводит к изменению переменного тока в катушке 5. Ток от трансформатора 6 поступает в усилитель 7 и оттуда на самописец 8 и показывающий прибор 9. Самописец записывает на специальной бумаге 10 профилограмму исследуемой поверхности.

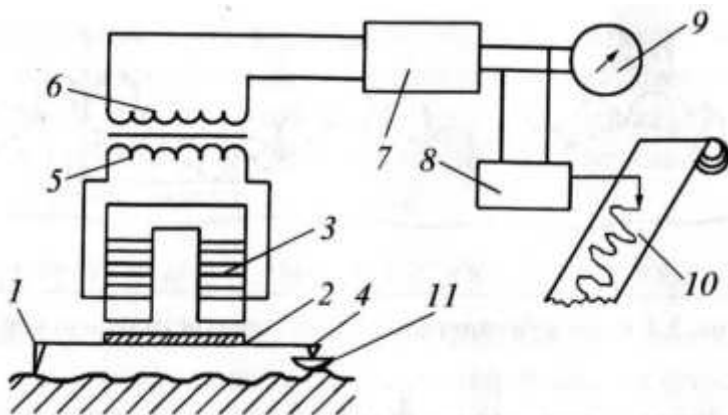


Рисунок 4 – Схему щупового прибора (обозначение в тексте)

Призма 4 закреплена неподвижно относительно шаровой опоры 11. Поскольку шар имеет большой радиус кривизны, то он скользит по вершинам микровыступов, опускаясь и поднимаясь в соответствии с имеющейся на поверхности волнистостью. Благодаря этому можно записать шероховатость поверхности, устранив влияние волнистости. Если шаровая опора будет скользить по специально изготовленной (эталонной) очень гладкой поверхности, то игла 1 будет записывать одновременно как шероховатость, так и волнистость.

В России профилометры-профилографы, основанные на вышеописанном принципе, выпускаются серийно Московским заводом «Калибр».

Роль смазки в трибосопряжении

В зависимости от вида сопрягаемых деталей и смазочного материала на границе их раздела могут происходить различного уровня физико-химические процессы, сопровождающиеся модификацией поверхностей сопрягаемых деталей с образованием вторичных структур. При оптимальном соотношении свойств этих структур образуются износостойкие вторичные структуры, которые способствуют снижению коэффициента трения и, соответственно, изнашивания.

В зависимости от количества смазочного материала, поступающего в зону контакта твердых тел, возможно возникновение различных видов смазки. Это можно проиллюстрировать с помощью диаграммы Герси-Штрибека (рисунок 5), устанавливающей зависимость между коэффициентом трения в подшипнике и числом Зоммерфельда.

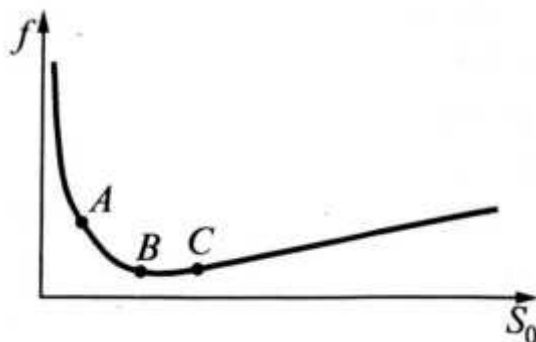


Рисунок 5 - Диаграмма Герси-Штрибека

В зоне смазки А-В имеет место граничное трение, в зоне В-С - жидкостное трение. Жидкостная смазка обеспечивает устойчивый режим работы сопряжения. Некоторое повышение коэффициента трения в зоне правее точки В связано с повышением толщины слоя смазки. Граничная смазка является неустойчивой фазой. Увеличение коэффициента трения на участке В-А связано со снижением частоты вращения вала. Это приводит к уменьшению толщины масляной пленки и, соответственно, повышению среднего давления, в результате чего ухудшаются условия работы сопряжения (прежде всего из-за схватывания поверхностей на микровыступах).

Наиболее благоприятные условия работы сопряжения обеспечивает жидкостное трение. При его реализации обеспечиваются минимальные значения коэффициента трения и снижение интенсивности изнашивания материалов.

Второе положительное качество смазки заключается в отводе тепла из зоны трения. С ростом температуры масло теряет свои эксплуатационные свойства - снижается

коэффициент динамической вязкости, а значит, и толщина гидродинамической пленки, разделяющей сопряженные поверхности.

Принудительное прокачивание масла через узел трения с последующей его очисткой в фильтрующих элементах кроме отвода тепла решает важную техническую задачу - удаление из зоны контакта трибосопряжений продуктов износа.

Третье положительное свойство смазки заключается в защите сопряженных деталей от коррозии. Защитные свойства масел обусловлены двумя основными факторами: механической изоляцией поверхности металлов от атмосферного воздействия и торможением электрохимических процессов коррозии на поверхности металлов.

Смазка улучшает динамические и акустические характеристики трибосопряжения, так как, обладая одновременно упругими и вязкими свойствами, помогает сглаживать динамические нагрузки и снижать шум в процессе эксплуатации механизма.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под макрогеометрией детали?
2. Каковы виды отклонений форм цилиндрических поверхностей?
3. Что понимают под микрогеометрией детали?
4. В чем отличие волнистости от шероховатости?
5. Какими методами можно оценить микрогеометрию детали?
6. В чем отличие щупового и оптического методов определения шероховатостей?

3. Трение без смазочного материала и в граничной смазке.

1) Трение без смазочного материала.

2) Трение в граничной смазке.

Трение без смазочного материала

Трение без смазочного материала и при отсутствии загрязнений между трущимися поверхностями бывает в тормозах, фрикционных передачах, в узлах машин текстильной, пищевой, химической промышленности, где смазочный материал во избежание порчи продукции либо по соображениям безопасности недопустим, а также в узлах машин, работающих в условиях высоких температур, когда любой смазочный материал не пригоден.

Мерой оценки трения служит коэффициент трения f , который определяется как отношение силы сопротивления относительно перемещению двух тел при трении $F_{тр}$ к нормальной составляющей реакции внешних сил F_n , действующих на поверхность тела:

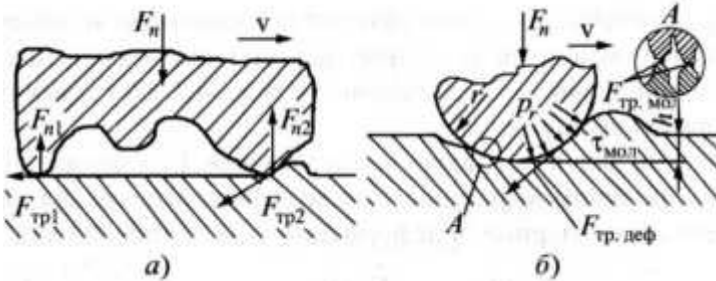
$$f = \frac{F_{mp}}{F_n}.$$

В настоящее время одной из наиболее развитых теорий трения является молекулярно-механическая теория трения. Ее основы были созданы в XX веке трудами ученых: Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Ф. Боудена, Д. Тейбора и др.

Природа внешнего трения двойственная. Она обусловлена рассеиванием энергии при преодолении сил молекулярного взаимодействия в зонах фактического контакта и затратами энергии на преодоление механического сопротивления, связанного с формоизменением трущихся поверхностей.

Существенным для понимания трения твердых тел в соответствии с молекулярно-механической теорией является то, что вследствие шероховатости и волнистости поверхностей контактирование всегда дискретно, т.е. происходит в отдельных пятнах контакта. Механическое взаимодействие обусловлено взаимным внедрением отдельных точек касания. Одна поверхность внедряется в другую не только за счет имевшейся

шероховатости, но и деформации, образующейся под нагрузкой вследствие анизотропии механических свойств рисунок 1.



а - сила трения, возникающая при контактном взаимодействии двух неровностей; б - контакт жесткой сферы с деформированным телом; F_n - нормальная нагрузка; $F_{тр}$ - сила трения; $\tau_{мол}$ - касательное напряжение среза; r и h - радиус неровности и глубина ее внедрения; $\Delta F_{мол}$ и $\Delta F_{тр.деф}$ - молекулярная и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность

Рисунок 1 – Контакт двух шероховатых тел

Суммарная величина силы трения имеет вид

$$F_{тр} = F_{тр.мол} + F_{тр.деф}.$$

На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала и т.п.) вызывают на том или ином числе участков адгезию. Она возможна между металлами и пленками окислов. Кроме того адгезия может быть обусловлена одновременно и действием электростатических сил.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщению.

Молекулярная составляющая имеет вид

$$f_{\text{мол}} = (\tau_0/p_r) + \beta,$$

где τ_0 – напряжение среза молекулярной связи;

p_r – фактическое давление в зоне контакта;

β – пьезокоэффициент.

Напряжение среза молекулярной связи и пьезокоэффициент являются характеристиками поверхностного слоя материалов и зависят от пленок, которые покрывают поверхность контактирующих тел. Для большинства металлов и полимеров $\tau_0 = 0,2 \dots 30$ МПа, $\beta = 0,02 \dots 0,15$.

Многие исследователи (Хольм, Стренг, Льюис и др.) считают, что составляющая силы трения, обусловленная пластической деформацией (механическим взаимодействием) поверхностей, обычно весьма незначительна (всего несколько процентов от суммарной силы трения). Так, трение металлических поверхностей в вакууме сопровождается большим коэффициентом трения (больше единицы). Если же в вакуумную камеру впустить воздух, то за очень короткий промежуток времени коэффициент трения уменьшается в несколько раз. За это время кислород не в состоянии образовать пленку окисла, чтобы сгладить самые небольшие неровности поверхности трения или воспрепятствовать их взаимному внедрению.

На основании этого можно сделать вывод, что молекулярная составляющая силы трения является причиной высокого значения последней в вакууме. Заметим, что при трении качения молекулярная составляющая сравнительно мало влияет на трение.

Деформационная составляющая коэффициента трения обусловлена взаимным внедрением отдельных точек касания. Одна поверхность внедряется в другую не только за счет имеющейся шероховатости, но и деформации, образующейся под нагрузкой вследствие анизотропии механических свойств.

Деформационную составляющую коэффициента трения находят из выражения

$$f_{\text{деф}} = k \sqrt{\frac{h}{r}}.$$

где $k = 0,55\alpha$ – пластическом контакте, $k = 0,19\alpha$ – при упругом контакте (α – коэффициент гистерезисных потерь материала);

h – глубина внедрения неровностей,

r – радиус неровностей.

Общий коэффициент трения для единичной неровности будет иметь вид

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k\sqrt{\frac{h}{r}}.$$

Анализ данного выражения показывает, что с увеличением нагрузки возрастает фактическое давление p_r при упругом контакте и, следовательно, уменьшается молекулярная составляющая коэффициента трения (первые два слагаемых). Одновременно увеличивается внедрение h неровности, вследствие чего увеличивается деформационная составляющая коэффициента трения. В общем случае f проходит через минимум и существует некоторое оптимальное значение давления $p_{r,\text{опт}}$, соответствующее этому минимуму (рисунок 2).

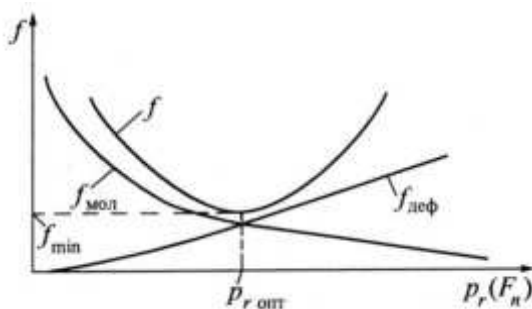


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Уменьшение Rz приводит к увеличению $f_{\text{мол}}$. Увеличение высоты выступов и, как следствие, уменьшение радиуса закругления их вершин приводит к росту деформационной составляющей силы трения.

При увеличении температуры, с одной стороны, уменьшается прочность молекулярных (адгезионных) связей, но, с другой стороны, увеличивается пластичность контакта и, следовательно, его площадь. Отсюда f увеличивается.

Температура в зоне контакта существенно зависит от скорости скольжения v .

Сила трения движения зависит от скорости скольжения поверхностей, причем соответственно давлению и твердости сопряженных тел коэффициент трения может монотонно возрастать, убывать, переходить через максимум или минимум.

Трение без смазочного материала сопровождается скачкообразным скольжением поверхностей, с чем связаны, например, вибрация автомобиля при включении сцепления, “дергание” при торможении, “визг” тормозов, вибрация резцов при резании и нарушение плавности работы медленно движущихся деталей. Можно указать некоторые мероприятия борьбы со “скачками” при трении — увеличение жесткости системы, повышение скорости скольжения, подбор пар трения, для которых коэффициент трения незначительно возрастает с ростом продолжительности неподвижного контакта и при повышении скорости через минимум не проходит.

Пленки окислов, влага и загрязнения на металлических поверхностях влияют на коэффициент трения двояко. Силы молекулярного притяжения между ними могут быть в сотни раз меньше, чем в случае взаимодействия металла на чистом контакте. Кроме того, прочность окислов обычно меньше прочности основного металла, поэтому сопротивление “пропахиванию” и срезанию частиц при перемещении, наряду с силами молекулярного взаимодействия, значительно понижается, и коэффициент трения падает. Толстые пленки окислов обладают меньшей твердостью, и наличие их приводит к повышению площади фактического контакта, причем, если это возрастание будет протекать быстрее, чем уменьшение механической составляющей силы трения, то произойдет увеличение силы трения.

На практике при переходе от одного вида нагружения фрикционной связи к другому коэффициент трения обычно изменяется. При расчете f необходимо учитывать вид контакта: упругий, пластический (ненасыщенный или насыщенный) или упругопластический.

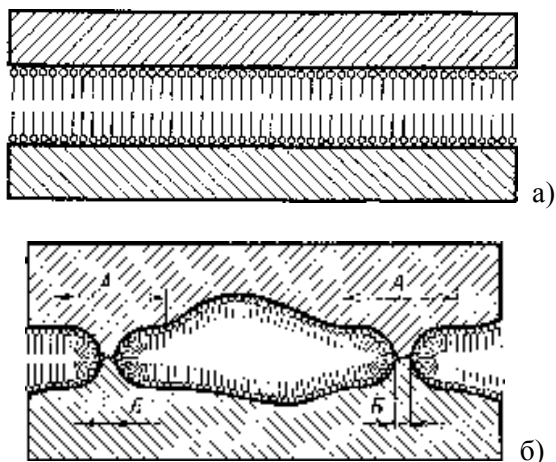
Трение в граничной смазке

При граничной смазке поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2... 10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

Все масла способны адсорбироваться на металлической поверхности. Прочность пленки зависит от наличия в ней активных молекул, качества и количества последних. Хотя минеральные смазочные масла являются механической смесью неактивных углеводородов, они, за исключением неработавших сверхчистых масел, всегда имеют включения органических кислот, смол и других поверхностно-активных веществ. Жирные кислоты входят в состав масел растительно-животного происхождения, а также в состав пластичных смазочных материалов. Поэтому почти все смазочные масла образуют на металлических поверхностях граничную фазу квазикристаллической структуры толщиной до 0,1 мкм, обладающую более или менее прочной связью с поверхностью и продольной когезией. Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности (стоймя), что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде ворса (рисунок 2). При взаимном перемещении поверхностей трения “ворсинки” как бы изгибаются в противоположные стороны. На самом же деле происходит сдвиг с перекосом квазикристаллической структуры пленки. Сопротивление ее скольжению в таком состоянии несколько повышено. На восстановление ориентации молекул в прежнее положение перпендикулярно поверхности тел требуется некоторый промежуток времени, иногда относительно большой.

Смазочный материал в граничном слое анизотропен, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и при толщине слоя больше некоторой критической величины скользят друг по другу; по нормали к твердой поверхности пленка обладает высоким сопротивлением сжатию; ее несущая способность исчисляется десятками тысяч

килограммов на 1 см^2 . Деформация сжатия пленки в довольно высоком интервале не выходит за пределы упругости.



а - смазка идеальных поверхностей; б - контактирование реальных поверхностей; А - участки, воспринимающие нагрузку; Б - участки непосредственного контактирования или контактирования при твердых пленках

Рисунок 2 – Схемы скольжения тел при граничной смазке

Механизм трения при граничной смазке представляется в следующем виде. Под нагрузкой протекает упругая в пластическая деформации на площадках контакта, под которыми здесь следует понимать площадки наиболее близкого прилегания поверхностей, покрытых граничной пленкой смазочного материала, вплоть до мономолекулярного слоя. На площадках контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки. Сопротивление движению при скольжении складывается из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления “пропахиванию” поверхностей внедрившимися объемами. Кроме того, на площадках контакта, подвергнутых наиболее значительной пластической деформации, и в пунктах с высокими местными температурами может произойти

разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии обнажившихся поверхностей, и даже схватывание металлов на микроучастках Б. Это вызывает дополнительное сопротивление движению.

Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что сообщает смазочной пленке свойство “самозалечиваться” при местных ее повреждениях. Эта способность играет большую роль в предупреждении лавинного процесса схватывания.

Невозобновляемая граничная пленка по мере возрастания пути трения изнашивается, масло из пленки адсорбируется на продукты износа и уносится с поверхности трения; происходит сублимация пленки как твердого тела и удаление масла в атмосферу. Окисление пленки способствует дезориентации структуры и разрушению ее.

Добавление в граничные слои смазочного материала и водных растворов поверхностно-активных веществ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа (до двух раз). При трении с граничной смазкой износ деталей машин велик. В силу волнистости и шероховатости поверхностей их контактирование происходит на очень малых участках трения; контактные давления имеют высокие значения, и тонкая граничная пленка масла не предохраняет поверхности от пластической деформации, что неизбежно ведет к износу деталей. Это является непреодолимым недостатком граничной смазки.

Эффективность смазочного действия помимо фактора адсорбции зависит от химического взаимодействия металла и смазочного материала. Жирные кислоты, вступая в реакцию с поверхностью металла, образуют мыла, т.е. металлические соли жирных кислот, способные вследствие свойственной им высокой когезии выдерживать без разрушения значительные деформации. Химическим явлениям принадлежит важная роль в организации смазывающего действия. Это подтверждает то обстоятельство, что инертные металлы и стекло плохо смазываются. Имеются косвенные основания считать, что

между металлом и углеводородными маслами протекают реакции, способствующие более прочной связи пленки с основанием. Так, силиконовая жидкость, имеющая высокую вязкость, но не являющаяся активной к металлу и не образующая, поэтому защитной пленки на металлической поверхности, не могла быть использована в качестве смазочного материала в подшипниках скольжения.

Опыты со сталью 45 при скорости скольжения 4,5 м/с в среде воздуха и аргона при трении без смазочного материала ($p = 1$ МПа) и трении при граничной смазке ($p = 1$ МПа) показали, что после истирания первичной пленки интенсивность изнашивания в аргоне превышала более чем в 30 раз интенсивность изнашивания в воздухе, а при граничной смазке в 950 раз (данные Б.И. Костецкого). Эти и аналогичные им опыты убедительно свидетельствуют о значительном влиянии кислорода на процесс трения при граничной смазке. По этому вопросу имеется две концепции.

Как предполагает Б. Лунн, реакция между металлом и смазочным маслом с учетом роли окружающей среды протекает следующим образом: металл играет роль катализатора или кислородоносителя, вызывая окисление масла с образованием в дальнейшем прочно сцепляющихся с металлом соединений. Эти химические реакции протекают в местах с наибольшими давлением и температурой, т. е. в точках металлического контакта и особенно на низкоплавкой структурной составляющей, проявляющей более высокую химическую активность. По Г.В. Виноградову смазочное масло играет роль основного кислородоносителя, причем граничный слой образуется и восстанавливается по мере его изнашивания не на самой поверхности, а на субмикроскопической окисной пленке.

В связи с невысокой термической стойкостью граничной пленки, образуемой на металлических поверхностях обычными минеральными смазочными маслами, иногда прибегают к искусственному повышению ее химической активности. Этого достигают путем введения в масла специальных добавок (присадок), содержащих органические соединения серы, фосфора, хлора или сочетание этих элементов.

Вводят также мышьяк и сурьму. Хотя эти присадки и прочно адсорбируются на поверхностях трения, однако им отводится в процессе трения другая роль. В условиях высоких температур, развивающихся на микроконтактах, активное соединение присадок разлагается и, взаимодействуя с металлическими поверхностями, образует пленки сульфида железа, фосфита или фосфата железа, хлористого железа и окисленных хлоридов и т.п. Образовавшиеся пленки предотвращают металлический контакт, понижают сопротивление трению, препятствуют дальнейшему локальному повышению температуры. Пленка оказывает слабое сопротивление срезу, срабатывается и восстанавливается вновь.

Пленка, образуемая на поверхности стали хлорированными углеводородами, работоспособна до температуры 300...400°C. Выше этой температуры происходит плавление и (или) разложение. У сульфидов температура плавления выше и смазывающая способность сохраняется до температуры 800°C. Ниже критической температуры пленки ведут себя как твердые смазочные материалы.

Очевидно, действие присадок неэффективно, если металл не вступает в реакцию с активной частью присадки. Например, платина и серебро не вступают в реакцию с серой.

Некоторые твердые тела могут производить смазочное действие, организуя и поддерживая режим трения при граничной смазке.

Из предыдущего вытекает, что граничная пленка должна обладать высоким сопротивлением продавливанию и низким сопротивлением срезу. Исходя из таких требований, к твердым смазочным материалам можно отнести некоторые тела слоисто-решетчатой, пластинчатой структуры, мягкие металлы и тонкие пленки пластиков.

Из тел слоисто-решетчатой структуры свойствами, необходимыми для смазки металлических поверхностей, обладают графит, молибденит (дисульфид молибдена MoS_2), сульфид серебра, пористый свинец и дисульфид вольфрама. Остановимся на механизме смазочного действия графита и

молибденита, который в общем, аналогичен и для других тел подобной структуры.

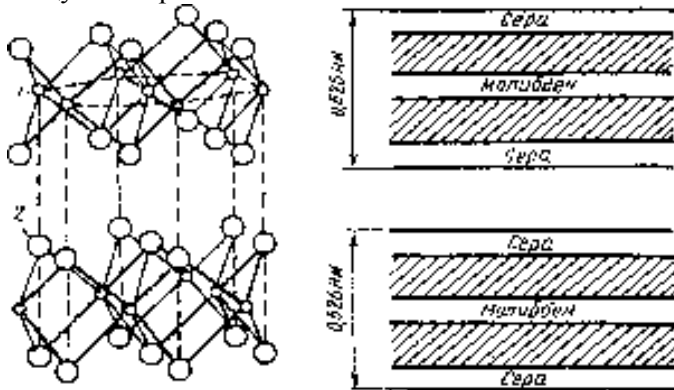
В кристаллической решетке графита атомы углерода расположены в параллельных слоях, отстоящих один от другого (ближайшего) на расстоянии 0,34 нм, а в каждом слое они размещаются в вершинах правильных шестиугольников с длиной стороны 0,14 нм (рис. 3). Так как силы взаимного притяжения между атомами тем меньше, чем больше расстояние между ними, то связи между атомами в слоях значительно прочнее, чем между слоями. Поэтому при большом сопротивлении графита сжатию перпендикулярно слоям (плоскостям спайности) сопротивление срезу параллельно слоям мало. Если учесть, что незакрепленные агрегаты пластинчатых кристаллов располагаются на металлической поверхности плоскостями спайности, то образовавшийся граничный слой из цепочек, нормальных к поверхности, обладает качествами (прочностью и сопротивлением деформации), характерными для граничных слоев, образованных смазочными маслами.

Твердость графита в направлении, перпендикулярном плоскости спайности, почти такая же, как у алмаза, что дает основание предположить, что соответствующим образом ориентированные частицы графита могут без разрушения внедриться в металлическую поверхность. По-видимому, вследствие этого, во всех случаях действенности смазки графитом металлический контакт поверхностей трения почти или совсем отсутствует; даже при значительной пластической деформации контактирующих поверхностных слоев сдвиги протекают под пленкой смазочного материала или внутри него. Слабое сопротивление графита срезу по плоскостям, параллельным плоскостям спайности, обуславливает при трении послойное скольжение в нанесенных на поверхностях пленках. Коэффициенты трения графитированных поверхностей могут достигнуть малых величин 0,03...0,04.

Приведенное описание не является полным. Некоторые факты не позволяют объяснить смазочное действие графита только слоистой структурой. Так, сила трения при смазке графитом в сухом воздухе выше, чем во влажном; сила трения в

атмосфере азота существенно больше, чем на воздухе, причем в сухом азоте выше, чем во влажном; графит не обладает хорошей смазочной способностью в восстановительной среде смеси газов. Таким образом, наличие пленки влаги или окисных пленок является необходимым условием для проявления графитом его смазывающего действия. Влага и окисные пленки на металлических поверхностях, образованию которых способствует влага, улучшают адгезию графита к этим поверхностям, без чего прочность граничного слоя недостаточна.

Кристаллическая решетка дисульфида молибдена (рисунок 3) подобна решетке графита: между атомами молибдена и серы имеются тесные связи, в то время как расстояние между слоями атомов серы относительно больше. Благодаря этому дисульфид молибдена можно использовать как смазочный материал как при низких температурах (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), так и в вакууме. При температуре $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ молибденит превращается в триокись, являющуюся абразивом.



1 - атомы молибдена; 2 - атомы серы

Рисунок 3 – Структура дисульфида молибдена MoS_2

При наличии на поверхности молибденита влаги сила трения увеличивается. Предполагается, что водяной пар реагирует с атомами серы, что может вызвать коррозию стальной поверхности.

Кроме тел слоисто-решетчатой структуры, все остальные твердые смазочные материалы образуют граничный слой с необходимыми качествами по сопротивлению сжатию и сдвигу (срезу), но не имеющий строго ориентированной структуры.

Твердыми смазочными материалами могут быть мягкие металлы, имеющие низкое сопротивление срезу в полезном диапазоне рабочих температур. Для смазки используют твердые пленки свинца, олова и индия.

Механизм действия тонких металлических пленок, нанесенных на твердое основание, по Ф. П. Боудену таков: нагрузка воспринимается через пленку, которая, обладая достаточной прочностью против выдавливания, предохраняет трущиеся поверхности от непосредственного контактирования и взаимного внедрения. При относительном перемещении поверхностей происходит срез в мягком металле. Поскольку сопротивление срезу невелико, а площадь фактического контакта благодаря твердой подкладке мала, то и сопротивление трению также мало. Пленка, нанесенная на мягкую подкладку, значительно деформирующаяся под нагрузкой, вступает в контакт с сопряженной поверхностью на большей площади, что увеличивает силу трения. Поэтому нанесение пленок мягких металлов, к примеру, на оловянный баббит неэффективно; более целесообразно применять их на свинцовистой бронзе и на медных сплавах.

Из мягких металлов в качестве твердых смазочных материалов можно использовать только те, которые не наклепываются в пределах рабочих температур и не образуют хрупких твердых растворов с металлами сопряженных тел. Чтобы металл не наклепывался, его рабочая температура должна быть выше температуры рекристаллизации. У олова, свинца и индия температура рекристаллизации ниже нормальной. Вместе с тем олово, которое хорошо работает как твердый смазочный материал (например, между чугунными поверхностями), непригодно для нанесения на свинцовистую бронзу, так как оно диффундирует с поверхности в медную основу бронзы, образуя твердые, выкрашивающиеся из рабочей поверхности кристаллы. Индий хотя при нагреве и

диффундирует в бронзу, соединяясь со свинцом, не образует хрупких соединений.

Некоторые материалы вследствие обычного металлургического процесса или искусственного пропитывания содержат вещества, способные служить твердым смазочным материалом; например, на приработанной поверхности конструкционного чугуна графит размазывается, образуя граничный слой. Такой же слой создается на поверхностях деталей из пористых антифрикционных материалов, пропитанных минеральными маслами, графитом и дисульфидом молибдена. В более широком понятии граничным смазочным материалом служит также политетрафторэтилен, когда им пропитывают пористые подшипниковые материалы. В свинцовистой бронзе, в твердой медной основе которой вкраплен свинец, последний при скольжении размазывается по поверхности, покрывая ее тонкой пленкой. Эта пленка по мере изнашивания сплава возобновляется. Дорожки качения и тела качения подшипника, работающего при температурах выше 300 °С, покрывают иногда серебром для предохранения от окисления и для использования в качестве смазывающего материала.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности трения без смазочного материала?
2. Как определить силу трения согласно молекулярно-механической теории трения?
3. Как определить молекулярную составляющую коэффициента трения?
4. Как определить деформационную составляющую коэффициента трения?
5. Как изменяется коэффициент трения в зависимости от варьирования нагрузки, температуры в зоне контакта пар трения, а также изменения их шероховатости и волнистости?
6. В чем особенность трения в граничной смазке?
7. Какими свойствами обладает смазочный материал в граничном слое?

4. Жидкостное трение и трение качения.

1) Жидкостное трение.

2) Трение качения.

Жидкостное трение

Жидкостная смазка характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем жидкого смазочного материала (масла), находящегося под давлением. Давление смазочного материала уравнивает внешнюю нагрузку. Слой смазочного материала называют несущим слоем. При увеличении его толщины, более толщины граничной пленки, уменьшается степень влияния твердой поверхности на далеко отстоящие от нее молекулы масла. Слои, находящиеся на расстоянии более 0,5 мкм от поверхности, приобретают возможность свободно перемещаться один относительно другого. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению слоев масла по толщине смазочной прослойки. Этот режим трения со свойственными ему весьма малыми коэффициентами трения является оптимальным для узла трения с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости. Сила трения при жидкостной смазке не зависит от природы сопрягаемых поверхностей.

Внешнее трение всегда сопровождается преобразованием кинетической энергии в тепло, т.е. является диссипативным процессом. В этом сходство внешнего и внутреннего трения.

Различие внешнего и внутреннего трения заключается в следующем:

- в геометрии взаимодействия трущихся поверхностей. При внешнем трении соприкосновение двух твердых тел происходит в отдельных точках, контакт дискретен, а площадь фактического контакта зависит от нагрузки;

- внутреннее трение характеризуется ламинарным перемещением материала в направлении вектора относительной скорости. При внешнем трении материал перемещается в

направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости;

- при внешнем трении возникновение и разрушение связей локализуется в тонком поверхностном слое. При внутреннем трении деформированная зона охватывает весь объем;

- природа внутреннего трения едина. Она связана с передачей количества движения от одного слоя (частицы) к другому. Природа внешнего трения двойственная: ($f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}}$).

Движение молекул внутри твердых тел, жидкостей и газов приводит к рассеиванию внутренней энергии вследствие столкновений, растяжения, кручения, колебаний и скольжения молекул. Это явление называют внутренним трением, и оно может принимать различные формы в зависимости от фазового состояния. В твердых телах - петля гистерезиса, в жидкостях и газах внутреннее трение проявляется как вязкость.

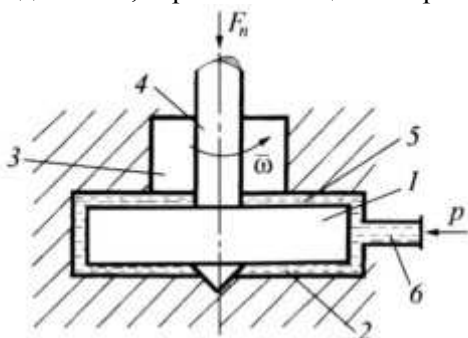
Вязкость - это физическое свойство жидкости, заключающееся в способности оказывать сопротивление относительному движению или деформации молекул.

Разделение трущихся поверхностей слоем жидкости (масла) достигается следующими способами:

- гидростатическим способом путем принудительной прокачки масла в зазор под давлением;
- посредством гидродинамического эффекта.

Первый метод используется для отдельных узлов трения, например, в гидростатическом подпятнике. На рисунке 4 представлена схема такого подпятника, жидкостное трение в котором осуществляется за счет масла, подаваемого в зазор между пятой 1 и подпятником 2 специальным насосом высокого давления. Давление в зазоре поддерживается все время постоянным, обычно не ниже 15...20 МПа. Для этих целей устанавливается специальное уплотнение 3 и устройство для поддержания заданного давления. В этом случае вал 4 как бы всплывает, а пята 1, окруженная со всех сторон слоем масла высокого давления, будет испытывать жидкостное трение при повороте вала.

Потери на трение в этом случае будут минимальные. Однако гидростатические подпятники и подшипники имеют очень существенные недостатки, ограничивающие их применение.



1 - пята; 2 - подпятник; 3 - специальное уплотнительное устройство; 4 - вал; 5 - слой жидкости высокого давления; 6 - система подачи масла

Рисунок 4 – Схема гидростатического подпятника

Для большинства таких подшипников и подпятников скольжения необходимо наличие специальных уплотнительных устройств, специальных насосных станций, а при умеренных и высоких скоростях вращения вала - специальной системы охлаждения узла трения и др.

На практике используется в основном гидродинамический эффект. Основы гидродинамической теории смазки созданы трудами Н.П. Петрова и О. Рейнольдса. В 1883 г. Н.П. Петров обосновал физические принципы гидродинамического эффекта. При проведении экспериментов он установил, что при уменьшении угловой скорости вала под влиянием нагрузки толщина масляного слоя в подшипнике скольжения уменьшается, и по форме этот слой отличается от кольцевой.

Гидродинамический эффект возникает вследствие затягивания в сужающийся зазор масла под влиянием трения о движущиеся стенки вала и подпятника. В этом случае внутри масляного клина возникает добавочное давление, способное уравновесить плавающий вал.

Большинство трущихся деталей имеют криволинейные поверхности, поэтому в них относительно просто реализуется эффект гидродинамического жидкостного трения, показанный на рисунке 5 на примере подшипника скольжения.

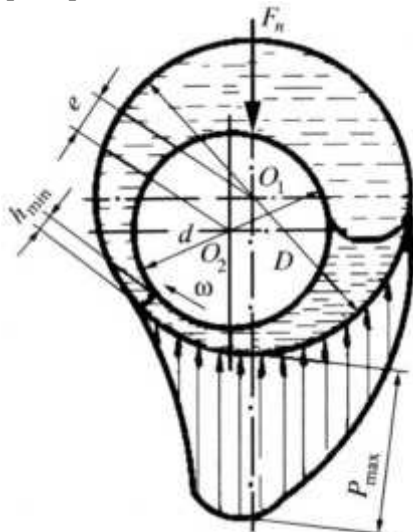


Рисунок 5 – Схема подшипника скольжения

Вал диаметром d вращается с угловой скоростью ω . При некоторой критической скорости $\omega_{кр}$ между поверхностью вала и втулки образуется непрерывный смазочный слой, отделяющий эти поверхности друг от друга. Центр вала занимает положение O_2 , вследствие чего образуется клиновидный зазор. В сечении плоскости, проходящей через линию центров O_1O_2 , смазочный слой имеет минимальную толщину h_{min} , величина которого должна удовлетворять неравенству:

$$h_{min} > K(Rz_1 + Rz_2),$$

где $K = 1,2... 1,3$ - коэффициент запаса.

Максимальное давление p_{max} смещено от оси O_1O_2 в сторону, противоположную вращению вала. Работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления вязкой жидкости, переходит в тепловую энергию, которая идет на нагрев масла и деталей подшипника.

Геометрия смазочного слоя и положение вала во втулке подшипника определяются двумя безразмерными параметрами: ψ - относительным зазором и χ - относительным эксцентриситетом:

$$\psi = \frac{D-d}{d} = \frac{R-r}{r} = \frac{\delta}{r};$$

$$\chi = \frac{e}{\delta},$$

где $\delta = R - r$; e - абсолютный эксцентриситет.

Коэффициент трения для подшипников скольжения f полученный Н.П. Петровым получают из выражения

$$f = \frac{F_{mp}}{F_n} = \frac{\pi \eta \omega}{\psi p}.$$

где ψ - относительный зазор; ω - угловая скорость; η - вязкость масла; p - давление.

Клиновой зазор является необходимым условием поддержания режима трения при жидкостной смазке в гидродинамической опоре. В плоских опорах клиновой зазор создается конструктивно, с помощью скосов поверхности, как это имеет место в ползунах и кольцевых опорах, либо благодаря самоустановке опорной поверхности (упорные подшипники типа подшипника Митчелла).

В опорном подшипнике скольжения диаметр отверстия больше диаметра цапфы, в результате между цапфой и вкладышем образуется клиновой серповидный зазор. При вращении цапфы смазывающая жидкость вовлекается силами вязкости в сужающийся зазор, что приводит к повышению давления в слое жидкости. При достаточных вязкости смазочного материала и скорости на окружности цапфы в слое масла создается давление, необходимое для отделения цапфы от вкладыша — цапфа как бы всплывает на тонком слое масла. Центр цапфы смещается от начального положения. Давление в слое масла поддерживается насосным действием вращающейся цапфы.

Наличие повышенного давления в слое масла приводит к сложной картине течения жидкости. Часть жидкости, вовлекаемая в зазор, вытесняется через входное сечение в сторону, обратно направлению вращения, основной поток

выносятся из нагруженной зоны по вращению вала, а остальная часть вытекает через торцы подшипника.

Согласно прикладной гидродинамической теории смазки в качестве необходимого условия трения при жидкостной смазке минимальный зазор между поверхностями должен быть не менее суммы средних высот неровностей поверхностей. Такая концепция вытекает из представления, что выступы одной поверхности контактируют с впадинами сопряженной поверхности. Поэтому во избежание зацепления неровностей одно из тел трения должно “всплыть” не менее чем на сумму средних высот неровностей. При определении наименьшей допустимой (критической) толщины смазочного слоя учитывают также степень деформации под нагрузкой, погрешности изготовления и монтажа деталей и возможность присутствия твердых примесей в масле.

Явление трения при жидкостной смазке в целом сложнее, чем это следует из гидродинамической теории, охватывающей чисто механическую сторону процесса. Молекулы поверхностно-активных веществ, содержащихся в масле, адсорбируются на поверхности в мономолекулярный слой, на котором образуется граничный слой, к граничному слою примыкает зона микротурбулентного движения, за которой следует ламинарный поток масла.

Трение качения

Из опыта человеческой деятельности известно, что работа, требуемая для качения тел друг относительно друга, обычно намного меньше, чем работа, необходимая для скольжения этих тел.

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

При качении колеса (рисунок 6) по деформируемой под нагрузкой F_n поверхности к нему надо приложить момент вращения $F_k R$ для поддержания равномерного движения. Этот момент уравнивается реактивным моментом $F_n^* K$, возникающим вследствие того, что реакция F_n^* , численно

равная внешней нагрузке F_n , смещена на величину K относительно линии действия силы F_n .

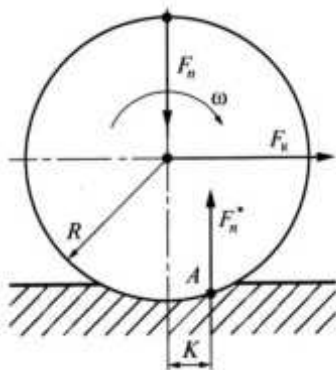


Рисунок 6 – Схема качения колеса по плоскости

Смещение K называется коэффициентом трения качения, наряду с этой величиной употребляется безразмерная величина f_k - коэффициент сопротивления качению:

$$f_k = \frac{K}{R} = \frac{F_k}{F_n^*}.$$

При использовании этого коэффициента необходимо указывать, на каком радиусе получено значение F_k .

При качении упругого колеса по упругому полупространству сопротивление качению F_k обусловлено тремя причинами: гистерезисными потерями F_1 , микро-проскальзыванием в зоне контакта F_2 и адгезией в контактной зоне F_3 :

$$F_k = F_1 + F_2 + F_3.$$

Упругий гистерезис F_1 возникает вследствие несовершенства упругих свойств реальных тел, участвующих в трении качения.

Гистерезис физически обусловлен переползанием дислокаций при нагружении. Увеличение числа дислокаций увеличивает гистерезисные потери.

При качении упругого катка по упругому полупространству вследствие их деформации создается площадка касания. В этом случае материал катка сжат, а материал опорной поверхности растянут (рисунок 7). Поэтому в зоне контакта точки катка

стремятся сблизиться при сжатии, а точки поверхности раздвинуться при растяжении. Это приводит к микропроскальзыванию F_2 в контактной зоне.

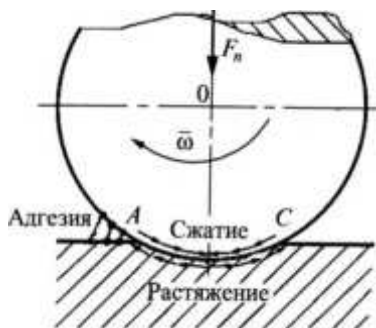


Рисунок 7 – Схема микропроскальзывания двух тел под нагрузкой

В зоне AC при качении поверхности будут разделяться с разрывом адгезионных связей, действующих между катком и поверхностью. Этим фактором обусловлено проявление адгезионной составляющей F_3 , в контактной зоне.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под жидкостным трением?
2. В чем отличие внешнего и внутреннего трения?
3. Что такое вязкость?
4. Каким образом возможно реализовать жидкостное трение?
5. Что такое гидродинамический эффект?
6. Что понимают под трением качения?
7. Из каких составляющих складывается сопротивление качения?

5. Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания пары трения.

- 1) Избирательный перенос как особый вид трения.**
- 2) Влияние нагружения на интенсивность изнашивания в зоне трибологического контакта.**
- 3) Влияние относительной скорости в зоне трибологического контакта на интенсивность изнашивания.**
- 4) Влияние температуры в зоне трения металлов на интенсивность процессов изнашивания.**

Избирательный перенос как особый вид трения

В 1956 году Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский обнаружили, что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключающей окисление меди, происходят явления избирательного переноса (ИП) меди из твердого раствора медного сплава, на сталь и обратного ее переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа пар трения.

Таким образом, ИП можно характеризовать как вид трения с новым смазочным материалом, при котором самопроизвольно в процессе работы на поверхностях трения образуется тонкая пластичная пленка металла, в которой происходят сдвиговые деформации. При самом простом рассмотрении ИП можно представить как трение двух деталей, между которыми имеется смазочный материал в виде пластичного металла. Механизм действия пластичной пленки таков: нагрузка воспринимается через пленку, которая, обладая достаточной прочностью против выдавливания, предохраняет трущиеся поверхности от непосредственного контактирования и взаимного внедрения. При относительном перемещении поверхностей происходит срез выступов шероховатости в мягком металле. Поскольку сопротивление среза невелико, а площадь фактического контакта благодаря твердой подкладке мала, то и сопротивление трению также мало. Опыты, по трению стального ползуна о пленку индия разной толщины, нанесенную на стальную подкладку, показали, что имеется оптимальная толщина пленки, при которой трение минимально. При радиусе полусферического ползуна 0,3 см и нагрузке 40 Н минимальная

сила трения соответствует толщине пленки 10^{-4} см, а при толщине пленки 10^{-6} см (около 30 атомных слоев) пленка перестает быть эффективной. Пленка наносилась гальваническим способом, что не исключало, наличия участков без покрытия. Следовательно, можно полагать, что при равномерной пленке на коэффициент трения могут оказать влияние пленки толщиной от одного до двух атомных слоев.

Долговечность и несущая способность приработочных металлических пленок в общем случае зависят от свойств покрытия и основного металла, прочности сцепления, толщины покрытия и его структуры, жидкого смазочного материала, скорости, нагрузки и температуры в узле трения, а также от геометрических характеристик контактирующих поверхностей (прямая или, обратная пара трения). Пленка быстро изнашивается главным образом вследствие окисления.

Основная отличительная черта работы пары трения в режиме ИП - протекающие в ней физико-химические и электрические процессы, которые обеспечивают длительное существование металлической пленки, удерживают частицы износа в зоне контакта и снижают усилия сдвиговых деформаций. Толщина пленки при ИП в 10...40 раз меньше начальной толщины приработочных покрытий. Если не касаться аналогии с приработочными покрытиями, то ИП можно было бы характеризовать как перевод узлов трения со смазывания минеральными или синтетическими маслами на смазывание пластичным металлом. Такая идея является весьма заманчивой, если учесть, что металлическая пленка выдерживает значительно большие нагрузки и обладает высокой термической стойкостью. Эти преимущества имеют особое значение при работе тяжело нагруженных узлов трения. При переводе узлов трения на смазывание металлами возникает проблема подачи и удержания пластичного металла в зоне контакта, исключения его наклепа, перенаклепа и сваривания поверхностей, обеспечения низкого коэффициента трения и т.д.

Влияние нагружения на интенсивность изнашивания в зоне трибологического контакта

Нагружение зоны контакта существенно влияет на интенсивность изнашивания при абразивном изнашивании,

которая обычно пропорциональна давлению (линейно и нелинейно) и пути трения. Интенсивность адгезионного изнашивания также пропорциональна давлению (нелинейно). На границе перехода от схватывания I рода к схватыванию II рода рост нагружения сокращает время перехода. Нагружение зоны трения, в которой изнашивание материалов является следствием питтинга, оказывает основное влияние на интенсивность изнашивания. Разрушение при питтинге заключается в образовании мелких трещин и в последующем отслаивании материала с типично усталостным характером.

Усталостная прочность характеризуется количеством циклов нагружения, она, в частности, обратно пропорциональна давлению в третьей степени

$$p^3\sigma = \text{idem},$$

где p - давление; σ - усталостная прочность.

Незначительное увеличение нагружения зоны трения приводит к значительному снижению усталостной прочности. Увеличение нагружения зоны трения может быть вызвано внешним нагружением или динамическим действием движущихся масс. При фреттинге износ линейно зависит от нагружения, если амплитуда скольжения постоянна. Кривая зависимости интенсивности изнашивания от нагружения имеет форму усталостной кривой Вёлера. На диаграмме можно выделить период ограниченной и неограниченной прочности. При небольшом нагружении процесс изнашивания в результате фреттинга в принципе не существует даже при количестве циклов больше 10^{10} .

Из сказанного выше следует, что нагружение является основным фактором, определяющим интенсивность изнашивания при всех механизмах разрушения материалов в зонах трения.

Влияние относительной скорости в зоне трибологического контакта на интенсивность изнашивания

Относительная скорость перемещений в зоне контакта является главной характеристикой спектра воздействий, вызывающих трибологическое изнашивание деталей машин. При абразивном изнашивании относительная скорость в зоне

трения имеет незначительное влияние на интенсивность изнашивания в 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 ведущим процессом физического старения является адгезионное изнашивание, то относительная скорость перемещения в зоне контакта оказывает большое влияние на качественные и количественные характеристики схватывания. При практически встречаемом диапазоне относительных скоростей в зоне трибологического контакта машин протекают три основных процесса: схватывание I рода, схватывание II рода, окисление.

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

При относительной скорости $0,5 \dots 1$ м/с износ в зонах трибологического контакта вызывается процессами окисления.

При скорости $1 \dots 5$ 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 $1000 \dots 1100$ °С. Такое термическое состояние сталей в зонах трения вызывает рекристаллизацию, отпуск и закалку металла ПС и образование вторичных структур. Микротвердость подповерхностных зон ПС $450 \dots 10\,500$ МПа.

При фреттинге скорость относительного смещения не

оказывает существенного влияния на развитие усталостных трещин. А вот скорости качения и скольжения существенно сказываются на толщине эластогидродинамического слоя, влияющего на образование усталостных трещин. При фреттинге значительное влияние на интенсивность процесса изнашивания оказывает количество циклов.

Влияние температуры в зоне трения металлов на интенсивность процессов изнашивания

В трибологических процессах интенсивность изнашивания материалов деталей ТС (твердые тела, жидкости), как правило, возрастает с увеличением температуры. При абразивном изнашивании количество теплоты, выделяющейся в зоне трения, невелико, потому что почти вся энергия расходуется на образование новых поверхностей. При небольших относительных скоростях скольжения температура существенно не повышается, поскольку теплота работы трения интенсивно отводится из зоны трения материалами контактирующих деталей и среды. В случае адгезионного изнашивания влияние температуры на интенсивность процесса существенно, потому что она благоприятствует схватыванию металлов.

Адгезионное изнашивание схватыванием II рода зависит в основном от температуры трибологических деталей. Максимальная температура поверхности трения t_{\max} равна сумме объемной температуры t_0 , среднеповерхностной t^* и температурной вспышки $t_{\text{всп}}$ вызванных трением,

$$t_{\max} = t_0 + t^* + t_{\text{всп}} .$$

Температура является важнейшим параметром адгезионных процессов и их интенсивности.

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

Если зоны трения изнашиваются вследствие питтинга при смазке, то влияние температуры на интенсивность процесса незначительно. Температура существенно влияет на вязкость масла и сорбционное действие присадок, и с этой точки зрения рост температуры интенсифицирует усталостное изнашивание. Влияние температуры на интенсивность фреттинг- изнашивания неоднозначное. На воздухе увеличение температуры приводит к снижению интенсивности изнашивания материалов, а в защитных средах к росту интенсивности.

Для хорошо механически обработанных поверхностей существует температура перехода, при которой износостойкость возрастает. Для меди эта температура около 50 °С, для стали 140 °С. При температуре около 500 °С интенсивность фреттинга невелика, потому что окислы, выполняющие функцию твердой смазки в зоне трения, стабильны.

Влияние температуры состоит в следующем:

- если по условиям службы узла или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклепывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности, размягчения - происходит выглаживание поверхности за счет растекания всего металла или только одной составляющей сплава;

- высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения; диффузия водорода;

- при интенсивном локальном повышении температуры (температурной вспышке) и последующем резком охлаждении поверхности нижележащей холодной массой металла на поверхности могут образоваться закалочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагрузки), снижающее температуру, при которой происходят структурные превращения;

- пластическая деформация, возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения - каждое в отдельности или совместно вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его разрыхление;

- при микроскопическом исследовании зоны контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена возможность образования магма-плазмы. Взаимодействие микроконтактов происходит за очень короткое время ($10^{-7}..10^{-8}$ с) в течение которого к месту контакта подводится большая энергия. Для таких условий законы классической термодинамики не выполняются; материал тонкого поверхностного слоя преобразуется, в результате в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под избирательным переносом?
2. Как влияет нагрузка в зоне контакта пары трения на интенсивность изнашивания?
3. Как влияет скорость движения деталей в зоне контакта пары трения на интенсивность изнашивания?
4. Как влияет температура в зоне контакта пары трения на интенсивность изнашивания?
5. Чем отличается схватывание I и II рода?

6. Абразивное изнашивание.

- 1) Сущность абразивного изнашивания.**
- 2) Абразивное изнашивание при ударе.**
- 3) Изнашивание в абразивной прослойке.**
- 4) Изнашивание в абразивной массе.**

Сущность абразивного изнашивания

Абразивным называется механическое изнашивание материала детали в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Абразивные частицы, обладая большей, чем металл твердостью, разрушают поверхность деталей и резко увеличивают их износ. Частицы чаще всего бывают минерального происхождения, оксидами, продуктами износа или наклепанными металлическими частицами. Они имеют различную форму, часто острые грани или ребра. Основным механизмом их воздействия - резание или царапание.

Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных видов изнашивания. В транспортных и дорожных машинах более 60 % случаев износа имеют абразивный характер.

В роли абразивных частиц могут выступать:

- неподвижно закрепленные твердые зерна, входящие в контакт по касательной либо под небольшим углом атаки к поверхности детали (например, шаржирование посторонними твердыми частицами мягких антифрикционных материалов);

- незакрепленные частицы, входящие в контакт с поверхностью детали (например, насыпные грузы при их транспортировании соответствующими устройствами, абразивные частицы в почве т.д.);

- свободные частицы, находящиеся в зазоре между сопряженными деталями;

- свободные абразивные частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда. В 1м³ воздуха содержится от 0,04 до 5 г пыли, на 60...80 % состоящей из

взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды и диоксиды кремния, соединения Al, Ca, Mg, Na и другие элементы). Частицы минералов, содержащихся в воздухе, обладают высокой твердостью (диоксид кремния SiO₂ 10 780... 11 700 МПа, оксид алюминия 20 900... 22 900 МПа), что превышает твердость рабочих поверхностей большинства деталей машин.

Абразивное изнашивание вызывают почва, грунт, руда, уголь и порода, зола, пыль, попавшие на поверхность трения, металлическая стружка, окисные пленки, закрепленные на поверхности трения или разрушенные, нагар и продукты износа и т.д.

Абразивное изнашивание при ударе

Процесс разрушения детали при ударном взаимодействии детали и абразива называют ударно-абразивным изнашиванием (рис. 8). Этому разрушению подвергаются детали буровых долот, камне- и рудомелющих агрегатов, породоразрушающий инструмент пневмо- и гидроударников, детали гусеничного хода машин и др. Ударно-абразивное изнашивание поверхности происходит из-за воздействия монолитного или свободного абразива.

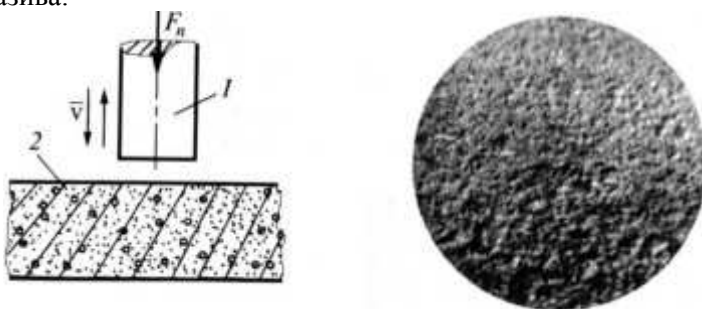


Рисунок 8 – схема воздействия образца 1 при ударе по абразиву (монолиту) 2, топография изношенной металлической поверхности (Ст 3, x10)

Для ударно-абразивного изнашивания характерно образование на поверхности трения лунок в результате локальной пластической деформации металла. Край лунок

образуют выступы, которые внедряются в сопряженную поверхность и имеют твердость, превышающую твердость металла, или имеют наиболее благоприятное расположение своих граней к поверхности детали. Края лунок с меньшей твердостью обычно разрушаются, не повреждая поверхность детали. При многократном взаимодействии абразива с поверхностью детали лунки расширяются и углубляются. В результате поверхность наклепывается, и происходит отрыв от нее частиц. Обычно это наблюдается у пластичных материалов. Для изнашивания твердых материалов характерно хрупкое выкрашивание.

При ударно-абразивном изнашивании износостойкость углеродистых сталей зависит не только от твердости, но и от состава и структуры стали. Максимальной износостойкостью обладает сталь, содержащая 0,7% углерода. Стали с большим содержанием углерода в результате хрупкого выкрашивания имеют меньшую износостойкость. При содержании углерода менее 0,7 % стали подвергаются пластической деформации и больше изнашиваются. Чем сильнее ударное взаимодействие, тем больше сказывается содержание углерода на износостойкости.

Изнашивание в абразивной прослойке

Изнашивание незакрепленными абразивными частицами обычно наступает при динамическом контактировании металлических поверхностей 1 и 2, когда между ними попадают абразивные частицы или иные твердые частицы 3 (рисунок 9).

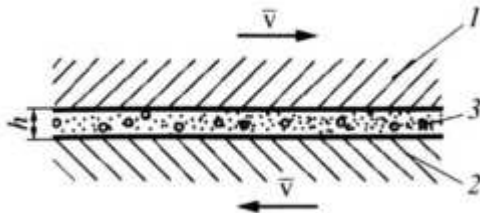


Рисунок 9 – Изнашивание металлических поверхностей в абразивной прослойке

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

Абразивное изнашивание может происходить весьма интенсивно и на достаточно смазанных поверхностях, когда приложенная нагрузка передается от одной детали к другой не только через слой смазочного материала, но и через абразивные частицы. При малой интенсивности изнашивания частицы размером около 0,01 мкм, присутствуя в зазоре, не могут сколько-нибудь существенно влиять на силу трения. С увеличением интенсивности изнашивания размер частиц обычно растет, и доля их участия в процессе изнашивания возрастает. Это часто приводит к тому, что начавшееся по какой-либо причине интенсивное изнашивание прогрессивно нарастает до заметного повреждения поверхностей.

Изнашивание в абразивной прослойке происходит в узлах и сочленениях, чаще всего в виде вал-втулка, различных машинах и механизмах.

При попадании абразивных частиц в подшипники с мягким антифрикционным слоем они впрессовываются в этот слой и ускоряют износ сопряженного вала. Способность подшипникового материала работать при смазочном материале, загрязненном абразивом, является важной его характеристикой.

Исследования ученых по изучению работоспособности подшипниковых материалов при смазочном материале, содержащем абразивные частицы, показали, что при попадании последних в подшипники происходит резкое повышение температуры. Для каждого подшипникового материала имеется критическая концентрация абразива, при которой подшипники выходят из строя. Износ цапфы также находится в линейной зависимости от концентрации абразива. Для абразивных частиц большего размера, чем номинальная толщина масляного слоя, повышение температурного режима подшипника пропорционально размеру частиц.

В некоторых случаях для улучшения работы твердых подшипниковых материалов, когда при эксплуатации неизбежно попадание в смазочный материал абразивных частиц, прибегают к изготовлению «сетчатых» подшипников с заполнением углублений «сетки», образованной из твердого материала, мягким антифрикционным металлом, например баббитом. Такое мероприятие значительно облегчает работу подшипника.

Разные материалы, применяемые в подшипниках, обладают различной работоспособностью при смазочном материале, содержащем абразив. Медь, свинцовистая бронза и алюминий наименее работоспособны и наиболее чувствительны к попаданию в смазочный материал абразивных частиц. Мягкие покрытия на твердых подшипниковых материалах значительно увеличивают работоспособность подшипника при наличии абразива.

Абразивные частицы не оказывают существенного действия на резиновые подшипники. Податливость резины не позволяет попадающей в зазор абразивной частице создавать высокое давление, при котором происходит шлифование поверхности стального вала; она может только полировать его. Для быстрого удаления абразивных частиц с поверхности подшипника на нем делают желобки или осевые канавки. При определенных условиях абразивные частицы скатываются в желобки и удаляются из подшипника. Абразивная стойкость резиновых подшипников уменьшается при заключении резинового слоя в жесткую обойму. Резиновые подшипники могут работать только при смазывании водой; при достаточной ее прокачке такие подшипники могут выдерживать очень большие окружные скорости (20 м/с и выше). Коэффициент трения резиновых подшипников практически не зависит от нагрузки; с увеличением частоты вращения вала коэффициент трения подшипника снижается.

Подобно резине в абразивной среде ведет себя поликапролактан, который может работать как на воде, так и на обычных маслах. Изучение под микроскопом поверхностных слоев капролактановых втулок, работавших в загрязненной абразивом среде, показывает, что абразивные частицы и

продукты износа металлической контрдетали шаржируют мягкую поверхность поликапролактама, проникая в тело. В итоге образуется подобие твердой корки, связанной полимером, и появляются расположенные на различной глубине механические включения.

При большом скоплении абразива может произойти настолько сильное заклинивание подшипника, что из-за проворачивания колец относительно посадочных поверхностей будут изнашиваться не только кольца, но и вал, и корпус.

При запыленности окружающего пространства и сложности выполнения надежных уплотнительных устройств одной из самых простых мер предохранения тихоходных трущихся узлов от воздействия пыли является смазывание их пластичным смазочным материалом.

Изнашивание в абразивной массе

При движении детали машин в массе незакрепленных абразивных частиц, абразивные частицы будут совершать по поверхности детали перемещение, сопровождаемое микрорезанием или пластическим деформированием детали.

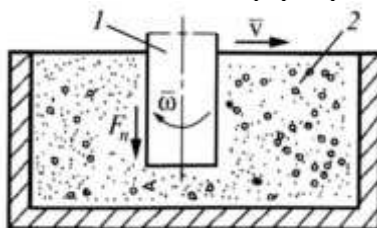


Рисунок 10 – Схема изнашивания образца 1 в абразивной массе

2

В зависимости от структуры абразивного материала среды, в которой зерна находятся, они могут вдавиться в эту среду, повернуться или даже выйти из зоны контакта, как, например, частицы кварца в почве под давлением ножа грейдера. Абразивная частица вдавливается в металл детали, если она обладает большей твердостью, чем металлическое зерно, и прочностью, достаточной для восприятия нагрузки,

необходимой для вдавливания в металл, и если ее достаточно поддерживает основа. Внедрившаяся частица при движении относительно поверхности может процарапать риску или срезать микроскопическую стружку. Резание может начаться только при определенном отношении глубины проникновения абразива к радиусу скругления внедрившейся кромки. Так, для стали (Ст. 3) это отношение должно быть больше 0,16 при сферической кромке. Если бы микрорезание было ведущим процессом разрушения поверхности при абразивном изнашивании или даже сопутствующим, то интенсивность изнашивания была бы настолько высокой, что рабочие органы (например, строительных и дорожных машин) выходили бы из строя после весьма малого времени работы, исчисляемого несколькими часами.

Выводы по влиянию твердости абразива, на износ металлов следующие: если твердость абразивных зерен значительно превышает твердость металла, то износ не зависит от разности твердостей абразива и металла; если твердость абразивных зерен ниже, чем твердость металла, то износ зависит от разницы твердостей и быстро уменьшается с увеличением этой разницы.

По данным М.М. Тененбаума, при твердости металлической поверхности, превышающей 60 % твердости абразива, износостойкость резко возрастает. Такое отношение твердостей можно назвать критическим.

Контрольные вопросы

1. Что такое абразивное изнашивание?
2. Как классифицируют абразивное изнашивание?
3. Какие частицы могут выступать в роли абразива?
4. Как повысить износостойкость детали при ударно-абразивном изнашивании?
5. Как повысить износостойкость детали при изнашивании в абразивной прослойке?
6. Как повысить износостойкость детали при изнашивании в абразивной массе?

7. Водородное изнашивание.

1) Сущность водородного изнашивания.

2) Виды водородного изнашивания.

3) Проявления водородного изнашивания и рекомендации по его снижению.

4) Отличие водородного изнашивания металла от водородного охрупчивания.

Сущность водородного изнашивания

Проблема водородного изнашивания возникла сравнительно недавно (40...45 лет назад). Из всех видов разрушения поверхностей при трении скольжения водородное изнашивание наиболее трудно поддается изучению, несмотря на то, что оно обнаруживается в узлах трения машин разных отраслей техники и по широте проявления может быть сравнимо с абразивным изнашиванием. Процессы, происходящие при водородном изнашивании, находятся на стыке таких областей науки, как электрохимия, органическая химия, катализ, химия полимеров и смазочных материалов, механохимия и др.

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

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна:

- адсорбцией водорода на поверхностях трения;

- диффузией водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения;

- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования. Характерным для разрушения

является мгновенное образование мелкодисперсного порошка материала водородом, проникшим в материал при выполнении технологических операций, который при трении диффундирует в поверхность и ускоряет процессы её изнашивания и разрушения;

- экзoeлектронной эмиссией, электроны которой сольватируются на молекулах воды и разлагают их на кислород и водород.

Таким образом, водородное изнашивание возникает в результате кооперативного (синергетического) взаимодействия поверхностных явлений: экзoэмиссии, адсорбции и трибодеструкции, которые приводят к выделению водорода. Кроме того, неравновесные процессы, возникающие при деформации поверхностного слоя металла, создают в процессе трения тепловые градиенты, электрические и магнитные поля и поля напряжений. Всё это приводит к диффузии водорода в металл, концентрации его в подповерхностном слое и ускоренному износу или разрушению этого слоя.

Виды водородного изнашивания

Различают следующие виды водородного изнашивания:

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

2) Водородное изнашивание разрушением имеет специфическую особенность: поверхностный слой стальной или чугунной детали разрушается мгновенно на глубину до 1,2 мкм. Это происходит, когда поверхностный слой накапливает большое количество водорода. Ранее отмечалось, что процесс трения создает условия высокой концентрации водорода в

поверхностных слоях стали. Концентрация водорода в стали непрерывно возрастает. Водород попадает в микротрещины, поры, межкристаллитные границы и др. При трении происходит периодическое деформирование поверхностного слоя, и объем дефектных мест (полостей) изменяется. Поступающий в полости водород молизуется и, не имея возможности выйти обратно при уменьшении объема, стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Повторение цикла вызывает эффект накопления, продолжающийся до тех пор, пока внутреннее давление в полостях не вызовет разрушения стали по всем развившимся и соединившимся трещинам.

Проявления водородного изнашивания и рекомендации по его снижению

Анализ эксплуатационных повреждений деталей и узлов трения выявил следующее. В узлах трения агрегатов авиационной техники, смазываемых керосином, пары трения закаленная сталь (12ХН3А, HRC 60) - бронза (НВ 61) разрушаются путём переноса частиц твёрдой стали на бронзу. Внешне разрушение проявлялось как износ стальной поверхности на глубину 0,03 мм и намазывание микроскопических лепестков стали на поверхность бронзовой детали (золотника). Это происходит из-за наводороживания стальной поверхности в процессе трения.

Водородный износ является причиной снижения надежности тормозных устройств в результате «намазывания» - переноса в процессе трения частичек чугуна или стали, из которых выполнен тормозной барабан, на полимерный фрикционный материал тормозной колодки. Здесь также более твердый материал переносится на более мягкий. Причиной намазывания, как выяснилось, является наводороживание стальной или чугунной поверхности и ее быстрое разрушение с переносом частиц износа на фрикционную пластмассу.

Влияние водородного износа было обнаружено и в парах трения, смазываемых водой (например, некоторые узлы трения судов), и при трении деталей из титана и его сплавов в условиях смазки минеральным маслом и в некоторых других случаях.

Установлен механизм ускоренного разрушения шарикоподшипников, основанный на образовании вакансионной диффузии водорода в высоконапряжённую сталь и её охрупчивании; механизм снижения контактной усталости при качении, обусловленной присутствием воды, растворённой в смазочном материале или топливе, приводящей к образованию небольших коррозионных повреждений, которые становятся концентраторами напряжений. Циклические напряжения, сконцентрированные у вершин микротрещины, водная коррозия и водородное охрупчивание действуют совместно, увеличивая рост трещины и разрушение поверхности.

Для устранения (снижения) водородного изнашивания в узлах трения в настоящее время разработаны различные меры:

1. Одним из основных способов является учёт степени наводороживания и охрупчивания при выборе материалов узлов трения. Наличие в стали хрома, титана, ванадия снижает проникновение в неё водорода в металл. Наклёп стали увеличивает его поглощение.

Холоднодеформированная сталь может поглотить в 1000 раз больше водорода, чем отожженная. Водородная хрупкость проявляется в большей степени в сталях ферритного класса. В закаленных или слабоотпущенных углеродистых и низколегированных сталях хрупкое разрушение может быть даже при ничтожно малом количестве водорода.

Необходимо, где возможно, исключать из узлов трения полимеры, способные к быстрому разложению и выделению водорода. Введение в тормозные материалы на основе полимеров измельченной на куски латунной проволоки улучшает фрикционные характеристики. В процессе интенсивного торможения при термомеханической деструкции полимера выделяющийся водород будет реагировать с окисной пленкой латунной проволоки. Это уменьшит поток водорода в стальное или чугунное контртело и тем самым отодвинет границу катастрофического водородного разрушения сопряженных поверхностей.

2. Для узлов трения, если имеется вероятность водородного изнашивания, необходимо применять смазочные материалы,

которые мало подвержены гидрогенизации. Уменьшение в керосинах меркаптанов (сернистых аналогов спиртов), тиоспиртов снижает возможность протекания химической реакции на поверхностях трения пары сталь - бронза и может исключить образование водорода.

В качестве присадок к смазочным жидкостям и фрикционным полимерным материалам могут быть введены кремний и органические соединения (силаны), содержащие несколько атомов хлора, которые легко соединяются с выделившимся водородом. С уменьшением числа атомов хлора эффективность присадки снижается.

3. В парах трения сталь - медный сплав необходимо исключать из последнего примеси сурьмы, соединений мышьяка, серы и др., способствующие выделению водорода.

4. Коррозию в узлах трения можно уменьшать путем изменения режимов работы: снижением температуры, скорости скольжения и давлений. Так, для пары трения бронза-сталь при работе в глицерине или в спиртоглицериновой смеси основным фактором наводороживания является температура. При 65...70 °С наводороживание происходит в несколько раз интенсивнее, чем при температуре 60°С.

5. Проникновение водорода можно существенно снизить, если из зоны наводороживания удалить (при их наличии) вещества, способствующие проникновению водорода: сероводород, фосфороводород, соединения мышьяка, селена, сурьмы, теллура. Действие сероводорода состоит в том, что он тормозит реакции рекомбинации атомарного водорода.

6. Оригинальный метод борьбы с водородным изнашиванием разработан Ю.А. Евдокимовым, В.И. Колесниковым и В.И. Тер-Оганесяном. Они установили, что при трении пластмассовой детали о стальную в зависимости от состава пластмассы детали могут заряжаться: стальная отрицательно, а пластмассовая положительно, или наоборот. Когда стальная деталь заряжается отрицательно, происходит ее усиленное наводороживание (водород заряжен положительно) и интенсивное разрушение при трении. Чтобы избежать водородного изнашивания, достаточно в пластмассу ввести

небольшое количество другой электроотрицательной пластмассы, например ПТФЭ (политетрафторэтилен). В этом случае стальная деталь будет заряжена положительно, а пластмассовая отрицательно. Водород не будет проникать в стальную деталь.

В целях снижения отрицательного действия водорода при создании новых фрикционных материалов для автомобилей во фрикционную пластмассу (М.М. Бородулин и И.В. Васильев) вводят закись меди или другие добавки, которые соединяются с водородом. Износостойкость фрикционного материала и сопряженного контртела при этом повышается в несколько раз, а главное, исчезает один из основных недостатков фрикционного материала - намазывание на него стали или чугуна.

Разработан метод удаления технологического водорода путем полирования поверхностного слоя детали (последняя технологическая обработка). При полировании, помимо незначительного удаления поверхностного слоя детали, верхние слои металла нагреваются, и деталь подвергается своеобразной термической обработке. Поскольку при полировании максимальная температура находится на поверхности, водород диффундирует к поверхности и десорбируется.

Отличие водородного изнашивания металла от водородного охрупчивания

Отличие водородного изнашивания металла от водородного охрупчивания

Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородным охрупчиванием стали ни по источникам наводороживания, ни по интенсивности и характеру распределения водорода в стали, ни по характеру разрушения.

Водородное изнашивание связано только с процессом трения и обусловлено трением. Для него характерны высокая локальная концентрация водорода в поверхностном слое стали, возникающая из-за больших градиентов температуры и напряжений при трении, которые обуславливают накопление

водорода и особый характер роста трещин, приводящий к сплошному разрушению слоя стали.

Водородное охрупчивание есть результат давления молекулярного водорода в макро - и микропустотах, а также в трещинах внутри металла. Здесь водород является разновидностью дефекта, понижающего прочность когезионной металлической связи. Водород производит блокирующее действие на дислокации.

Подавляющее большинство методов борьбы с водородным изнашиванием не может быть использовано для снижения водородного охрупчивания ввиду принципиальных различий этих явлений. Водородное изнашивание - явление самоорганизующееся; по сложности и масштабам проявления оно превосходит явление водородного охрупчивания. Между тем, процессы водородного охрупчивания, а также процессы водородного растрескивания сталей и сплавов изучены в большей степени.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под водородным изнашиванием?
2. Как проявляется водородное изнашивание?
3. Чем отличается водородное изнашивание от водородного охрупчивания?
4. Какие принимают меры по снижению водородного изнашивания?
5. Какие факторы могут интенсифицировать процесс водородного изнашивания?

8. Окислительное изнашивание.

- 1) Окислительное изнашивание.**
- 2) Кавитационное изнашивание.**
- 3) Эрозионное изнашивание.**

Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание происходит под влиянием одновременно коррозионного и механического факторов.

Кислород воздуха или смазки, вступая во взаимодействие с металлом, образует на нем оксидную пленку, оказывающую значительное влияние на процессы трения и изнашивания. Механизм окислительного изнашивания состоит из ряда стадий: диффузии кислорода к поверхности металла; роста оксидной пленки; механического разрушения оксидной пленки при скольжении (качении) и далее стадии повторяются. Таким образом, окислительное изнашивание представляет собой изнашивание непрерывно возобновляемых оксидных пленок. В отличие от чистой коррозии, которая протекает в статических условиях, окислительное изнашивание связано всегда со скольжением, качением сопряженных деталей, т.е. подвержено динамическому воздействию.

По характеру протекания коррозионных процессов различают химическую и электрохимическую коррозию.

При химической коррозии наблюдается преимущественное развитие на поверхности металлов окислительных процессов с образованием оксидной пленки. Одним из главных факторов, ускоряющим этот процесс, является температура. С повышением температуры окружающей среды резко возрастает химическая коррозия.

К электрохимической коррозии относятся все случаи коррозии в водных растворах, при которых разрушение металлов может происходить в результате образования нерастворимых продуктов (ржавчины) или переход металла в раствор в виде ионов.

Для увеличения ресурса работы узлов трения в условиях коррозионно-механического изнашивания применяют коррозионно - стойкие стали с повышенным содержанием хрома (12... 15 %) и никеля (от 8 % и выше). Введение в железо

примерно 12 % хрома способствует резкому повышению электрохимического потенциала сплава. Такие сплавы ведут себя как благородные металлы. Они не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

В алюминиевые и магниевые сплавы для повышения коррозионной стойкости вводится марганец, что защищает их от межкристаллитной коррозии.

Другим эффективным средством является использование смазочных материалов с антикоррозионными присадками.

Антикоррозионные присадки способствуют уменьшению окисляемости масел, химическому и каталитическому восстановлению окисляющих веществ, содержащихся в масле, и пассивируют поверхность металла. Основное же действие антикоррозионных присадок заключается в том, что они химически действуют на поверхность смазываемого металла и образуют на ней прочную пленку. Сера и фосфор, как главные составляющие, входящие в том или ином виде в антикоррозионные присадки, обеспечивают в результате химической реакции образование на смазываемой поверхности тонкой прочной защитной пленки, которая способна противостоять действию масла и химическому воздействию активных его составляющих при повышенных температурах. Присадка должна быть такой, чтобы пленка во время работы не отслаивалась и была устойчива против моющих (диспергирующих) присадок. Установлено, что чем выше температура масла, тем выше коррозионная агрессивность и тем менее эффективно защитное действие присадки. В качестве антикоррозионных присадок применяются различные химические соединения, содержащие серу, фосфор: трибутилфосфит, трифенилфосфит, тиофосфорные соединения, органические сульфиды, осерненное масло и др. Фосфитные присадки уменьшают кислотность окисленных масел, а осерненное масло, наоборот, усиливает окисление. Добавляются обе эти группы присадок в количестве до 1 % к весу масла.

В ряде случаев интенсивность окислительного изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив температуру узла. Казалось бы, применение коррозиестойкой

стали должно дать дополнительный эффект, однако аустенитные стали, не говоря о склонности их к схватыванию, быстро окисляются в процессе трения.

Кавитационное изнашивание

Кавитационное изнашивание - механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное, высокое ударное давление или высокую температуру.

Повреждение поверхности имеет каверны диаметром от 0,2 до 1,5 мм. Вокруг каверн имеются наплывы, создающие впечатление выдавленных кратеров. Таким образом, вид повреждения металла в чистой воде свидетельствует о том, что поверхность металла подвержена механическому воздействию.

Кавитация возникает в тех участках, на которых нарушается сплошность потока жидкости, в результате чего образуются пустоты и полости, заполненные воздухом или паром. Эти так называемые кавитационные пузыри, находясь у поверхности металла, сокращаются с большой скоростью и затем разрываются, что приводит к гидравлическому удару жидкости о поверхность металла. При наложении на поверхность металла огромного количества таких ударов и образуются очаги разрушения.

Киносъемка показала, что кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001 с. По данным В.Я. Карелина, при определенных этапах кавитации на площади в 1 см² в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 млн. кавитационных пузырьков.

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

Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия. Она способствует закоксовыванию распылителей форсунок двигателей внутреннего сгорания.

Труднообтекаемая форма и неровности поверхностей, включая неровности, образовавшиеся по причине кавитационного изнашивания, служат причиной образования вихрей и отставания струй от стенок рабочих каналов, способствует возникновению или усилению кавитации.

Предпосылки для наступления и протекания кавитационного изнашивания следующие. При замыкании до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали, последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам. Из нескольких миллионов образовавшихся кавитационных пузырьков примерно один из 30 тыс. участвует в разрушении. Под действием ударов поверхность металла начинает деформироваться и подвергаться наклепу; появляются линии сдвига, и происходит как бы своеобразное травление с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение и перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается, прежде всего, менее прочная структурная составляющая (в сталях - феррит, в чугунах - графитовые включения). Затем может последовать выкрашивание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пределах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерен и связи между ними.

Методы борьбы с кавитационным изнашиванием

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

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и материала деталей. Влияние вязкости незначительное. С увеличением поверхностного натяжения изнашивание происходит более интенсивно.

Введение в воду веществ, образующих и способствующих образованию эмульсий (масла и эмульгаторы), понижает поверхностное натяжение жидкости и снижает кавитационное изнашивание. Наибольшая интенсивность изнашивания наблюдается в воде с температурой 50 °С.

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

Закалка с нагревом ТВЧ, цементация, поверхностное упрочнение, в том числе твердые наплавки, сообщают, стали значительную кавитационную стойкость. То же относится к хромовому покрытию при достаточной его толщине (около 40 мкм) и сплошности (молочный хром). При малой толщине (менее 20 мкм) разрушение происходит под слоем хрома; существенную роль играет прочность основания. Латунь благодаря своей вязкости стойка к кавитационному изнашиванию. Сравнительно хорошей кавитационной стойкостью обладает резиновое покрытие.

Эрозионное изнашивание

Эрозия в широком понятии - процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие - разрушение поверхности материалов вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии. Эрозию подразделяют на: газовую, кавитационную, абразивную и электрическую. Каждый вид эрозии имеет подвиды, которые являются сочетанием отдельных видов, например, газовая эрозия может быть газоабразивной, газопылевой, газопылевой и т.д.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Вообще говоря, скорость изнашивания в этом случае мала. Большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладающих способностью к наклепу, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпывается, эти участки разрушаются, вымываются.

Газовой эрозии подвергаются лопатки газотурбинных установок, трубы экономайзеров, лопатки дымососов, стальные и чугунные кольца двигателей и т.д.

Основными факторами газовой эрозии, определяющими интенсивность разрушения металла, являются скорость и температура потока, а также степень его запыленности.

Для повышения долговечности деталей машин и оборудования, подвергающихся действию газовой эрозии, необходимо, прежде всего повышать сопротивление металла окислению в данной газовой среде, по возможности снижать скорость потока газа и защищать рабочие поверхности металла от непосредственного воздействия на металл механических примесей, содержащихся в газе.

Горячая газовая эрозия пластмасс и теплозащитных покрытий получила название абляции. Это явление проявляется, например, при движении баллистического снаряда в плотных слоях атмосферы или под действием горячих отработанных газов при работе ракетных двигателей. Абляция сопровождается тепловыми и механическими эффектами и включает ряд явлений: эрозию от ударов твердых частиц или капель; срезание материала от действия аэродинамических усилий; отслаивание (растрескивание и отделение чешуек вследствие теплового расширения); сдувание расплавленного материала потоком газов; сублимацию; испарение; пиролиз; сгорание.

Стойкость пластмасс к абляции зависит от теплопроводности. В противоположность металлам пластмассы должны иметь низкую теплопроводность. Детали, отлитые под высоким давлением, лучше сопротивляются абляции по сравнению с деталями, отлитыми при низком давлении.

Жидкостная эрозия при определенных значениях скорости потока по своей природе мало чем отличается от газовой. Трение потока жидкости о металл вызывает разрушение продуктов коррозии (окисных пленок), которые обычно образуются в результате протекания на поверхности детали химических или электромеханических процессов. Жидкостная эрозия весьма интенсивно разрушает металл гребных винтов, деталей гидротурбин, различных трубопроводов, по которым жидкость течет с достаточно большой скоростью.

Разрушение металла в результате жидкостной эрозии в чистой воде имеет вид пятен, полос, рубцов, вымоин. При наличии в воде абразивных частиц, например песка и глины, процесс разрушения протекает более интенсивно. На поверхности деталей образуются характерные вымоины большой глубины.

Наиболее вероятный механизм разрушения металла в данных условиях имеет коррозионно-механическую природу, поэтому эффективным средством увеличения долговечности материала является увеличение его коррозионной стойкости и износостойкости.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под окислительным изнашиванием?
2. В чем отличие химической от электрохимической коррозии?
3. Какие меры применяют для снижения окислительного изнашивания?
4. Что понимают под кавитационным изнашиванием?
5. Как проявляется кавитационное изнашивание?
6. Какие меры применяют для снижения кавитационного изнашивания?
7. Что понимают под эрозионным изнашиванием?
8. Как проявляется эрозионное изнашивание?
9. Какие меры применяют для снижения эрозионного изнашивания?

9. Фреттинг-коррозия, адгезионное и усталостное изнашивание.

- 1) Усталостное изнашивание.**
- 2) Адгезионное изнашивание.**
- 3) Изнашивание при фреттинг-коррозии.**

Усталостное изнашивание

Причиной возникновения этого вида изнашивания являются усталостные явления в поверхностных слоях металла, вследствие чего образуются трещины, а затем и выкрашиваются поверхности (питтинг).

Усталостное изнашивание наблюдается в условиях высоких контактных нагрузок при одновременном качении и проскальзывании поверхностей одной по другой в присутствии смазочных материалов. В таких условиях работают, например, зубчатые колеса, тяжело нагруженные шестерни и подшипники качения, зубчатые венцы.

Процесс прогрессирующего усталостного изнашивания протекает следующим образом. Сначала на трущейся поверхности образуются усталостные трещины. Смазочный материал, попадая в трещины, способствует их раскливанию и выкрашиванию частиц металла, в результате чего на поверхности детали появляются мелкие оспины (питтинг). Число этих оспин и одновременно их размеры увеличиваются до тех пор, пока повышающиеся контактные напряжения на рабочих поверхностях не приведут к пластической деформации и интенсивному износу детали.

Наибольшее влияние на развитие усталостного изнашивания оказывают условия трения (нагрузка и температура), свойства материалов (твердость и шероховатость поверхности) и применяемые смазочные материалы.

При интенсивном истирании рабочих поверхностей изнашивание их происходит быстрее, чем образование усталостных трещин. Поэтому, как правило, в таких случаях питтинг не наблюдается.

Изнашивание вследствие пластической деформации

Этот вид усталостного изнашивания (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов. Пластическое

деформирование обычно сопровождается износом металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения. Здесь же имеется в виду деформация, распространяющаяся на всю деталь или на значительные ее объемы. Смятие может произойти при трении, но может быть и не связано непосредственно со скольжением или качением поверхностей.

Адгезионное изнашивание

Адгезионное изнашивание возникает вследствие действия сил молекулярного сцепления на поверхности раздела двух металлических деталей с образованием адгезионных связей (мостиков сварки). Этот вид взаимодействия называют изнашиванием при заедании, схватывании и т.д.

Сила адгезионного взаимодействия зависит от степени чистоты поверхностей, площади фактического контакта, природы материалов, нагрузки и температуры на контакте. Для адгезионного схватывания или заедания сопрягаемых материалов на площади фактического контакта энергетическое состояние может достигаться как за счет повышения температуры, так и за счет совместного пластического деформирования. В связи с этим различают два вида заедания: холодное при высоких контактных давлениях на фактических пятнах касания, достигающих предела текучести материала и относительно малых скоростях скольжения; горячее - при высоких скоростях скольжения и температурах свыше 100...150 °С.

При холодном заедании, как правило, повышается коэффициент трения до величины $f = 0,3 \dots 1,0$, в результате чего может прекратиться относительное движение деталей машин. Холодное заедание характерно для тяжело нагруженных малоподвижных трибосопряжений, работающих в режиме граничного трения, горячее - для высокоскоростных узлов трения, когда вследствие разрушения гидродинамической смазочной пленки происходит касание микровыступов тел и мгновенное повышение температуры поверхности.

При горячем заедании процессы разрушения металлов локализуются в тонком размягченном поверхностном слое и протекают менее катастрофично, чем при холодном заедании.

Поверхности трения после горячего заедания хотя и имеют продольные риски и борозды, но глубина их значительно меньше и кромки рисков обычно скруглены за счет оплавления металла. Температура при горячем заедании играет двойную роль: она интенсифицирует процесс схватывания за счет разрушения смазочной пленки и снижения прочности металлов, но при этом локализирует процессы разрушения в тонком поверхностном слое. В результате этого, при горячем заедании интенсивность изнашивания материалов и коэффициент трения скольжения несколько ниже, чем при холодном.

Природа металлов и их структура играют важную роль при заедании. Чем больше отличаются свойства контактирующих металлов, тем меньше они склонны к схватыванию. Склонность к заеданию одноименных металлов уменьшается с увеличением различий в их структуре. Так, вероятность заедания стальных поверхностей снижается по мере увеличения различий в их химическом составе, термической обработки, твердости. Повышенной склонностью к заеданию обладают аустенитные коррозионно-стойкие стали, так как аустенитная структура является наиболее однородной. Более стойки к заеданию гетерогенные структуры, такие как мартенсит и особенно мелкопластинчатый перлит.

При температурах на контакте выше 800...850 °С обычно происходит резкое увеличение адгезионного износа. В этом случае большое влияние оказывают диффузионные процессы, характерные при обработке металлов резанием. Изменения в механизме изнашивания происходят в результате диффузионного растворения одного металла в другом и интенсивность адгезионно-диффузионного изнашивания возрастает.

Изнашивание при фреттинг-коррозии

Изнашивание при фреттинг-коррозии - это коррозионномеханическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язв и продуктов коррозии в виде налета,

пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь - сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь - олово или алюминий, сурьма, а также чугун - бакелит или хром и многие другие пары трения.

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

При фреттинг-коррозии относительная скорость движения соприкасающихся поверхностей небольшая. Так, в случае гармонических колебаний с амплитудой 0,025 мм и частотой 50 с⁻¹ средняя скорость составляет 2,5 мм/с.

Язвы и продукты коррозии на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения, на осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, на запрессованных в картерах вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на центрирующих поверхностях шлицевых соединений, на опорах силоизмерительных устройств, на опорных поверхностях пружин, на затянутых стыках, в заклепочных соединениях между листами, на заклепках и в отверстиях, на болтах и т. п. - результат проявления фреттинг-коррозии. Этот вид коррозии наблюдается в проволочных канатах, электровыключателях, рубильниках и штепсельных разъемах.

Повреждения поверхностей вследствие фреттинг-коррозии служат концентраторами напряжений и снижают предел усталости. Иногда усталостные трещины из-за фреттинг-коррозии появляются на валах под напрессованными деталями в местах, расположенных вдали от расчетных опасных сечений.

Контактирующие поверхности повреждаются вследствие фреттинг-коррозии и в то время, когда машина не работает из-за вибрации, возбуждаемой работающими механизмами.

Механизм фреттинг-коррозии. При фреттинг-коррозии протекают следующие процессы. Под действием сил трения

кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях расшатывается и разрушается. Процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания. Оторвавшиеся частицы металла подвергаются быстрому окислению. Дополнительным источником повреждения поверхностей может явиться возникающее местами схватывание сопряженных металлов.

Упрощенная схема процесса фреттинг-коррозии в начальной фазе такова: перемещение и деформация поверхностей под действием переменных касательных напряжений - коррозия - разрушение окисных и других пленок - обнажение чистого металла и местами схватывание - разрушение очагов схватывания и адсорбция кислорода на обнаженных участках.

Образование окисных пленок на металлической поверхности или продуктов изнашивания в виде окислов изменяет характер протекания процесса.

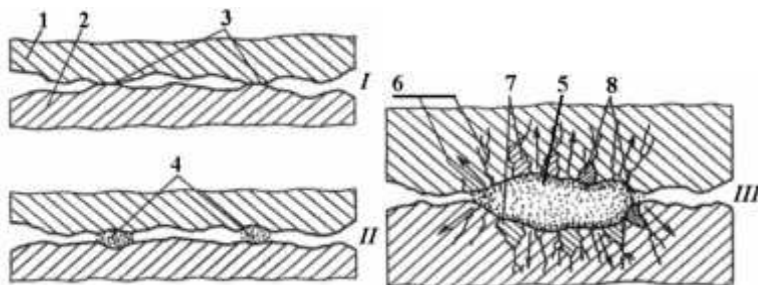
Окислению металла сопутствует увеличение объема. При наличии в сопряжении замкнутых контуров (например, в цилиндрических сопряжениях) это приводит к местному повышению давления, что способствует повышению интенсивности изнашивания и возникновению питтингов. Окислы оказывают абразивное действие, которое зависит от прочности сцепления окисных пленок с основным металлом, твердости окислов и размеров их частиц в продуктах изнашивания. Твердость окислов металлов, как правило, больше твердости чистых металлов.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде показан на рисунке 11.

Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (I).

При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные окисными пленками (II), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (III). В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов

производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц окислов повышается температура, и происходит образование твердых структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.



- 1, 2 - контактирующие детали; 3 - точки контакта поверхностей;
 4 - мелкие зарождающиеся каверны; 5 - общая большая каверна;
 6 - трещины; 7 - отколовшиеся объемы металла;
 8 - отколовшиеся частицы с твердой структурой

Рисунок 11 - Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии

С увеличением давления, а в особенности амплитуды относительных смещений, скорость изнашивания при фреттинг-коррозии возрастает. Этот рост при повышении давления обусловлен увеличением площади контакта, поражаемой коррозией. Повышение частоты перемещений ускоряет изнашивание, но, начиная с некоторой частоты, снижается активность факторов, протекающих во времени (окислительные процессы, наклеп и др.), и рост скорости изнашивания уменьшается.

Методы борьбы с фреттинг-коррозией. Универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет. Если исходить из того, что взаимное микросмещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует:

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

Уменьшить относительное микросмещение можно путем придания деталям соответствующей конфигурации или посредством повышения силы трения. Что касается конфигурации деталей, то общеизвестно, что применение разгружающих выточек в ступицах повышает предел выносливости валов и осей.

Силы трения можно увеличить, повысив давление путем уменьшения площади контакта деталей или повысив коэффициент трения за счет увеличения шероховатости поверхностей. Повышение давления может быть действенным, если проскальзывание поверхностей значительно снизится и будет скорее субмикроскопического, нежели микроскопического характера; в противном случае результаты будут прямо противоположны ожидаемым. Шероховатость поверхностей может длительно влиять на коэффициент трения, если один из элементов пары не является металлом. Другой метод увеличения силы трения состоит в нанесении на поверхность электролитического слоя меди, олова, кадмия, серебра или золота. Сила трения возрастает за счет повышения фактической площади контакта сопрягаемых деталей. Например, можно исключить фреттинг-коррозию между литым алюминиевым картером и корпусом подшипника с помощью лужения. Кадмирование вкладышей, болтов и других деталей для защиты от коррозии и фреттинг-коррозии широко распространено в авиационной и автомобильной промышленности. Однако при значительных микросмещениях эти покрытия сами подвергаются фреттинг-коррозии и быстро изнашиваются.

Если исключить вибрацию невозможно, то ослабить повреждение поверхностей можно снижением силы трения или перенесением скольжения в промежуточную среду. Для снижения удельной силы трения достаточно понизить давление или уменьшить коэффициент трения. В условиях фреттинг-коррозии обычные смазочные материалы не влияют на коэффициент трения, так как граничная пленка в процессе работы не пополняется и быстро разрушается.

Свинцовые и индиевые покрытия при малом сопротивлении сдвигу играют роль твердых смазочных материалов. Хотя сила

трения при этом и уменьшается, основное назначение покрытий состоит в перенесении процесса смещений во внутрь покрытия. Все покрытия срабатываются, большая или меньшая их эффективность определяется сроком службы.

Хорошую сопротивляемость фреттинг-коррозии оказывают пары сталь - политетрафторэтилен или полиамиды. Действенным средством могут стать резиновые прокладки.

Уменьшить повреждение от фреттинг-коррозии можно также, повышая твердость одной детали. При увеличении твердости стали уменьшается взаимное внедрение деталей, что снижает интенсивность изнашивания; кроме того, продукты изнашивания в этом случае меньше по размерам и их абразивное действие слабее. Закалка и азотирование полезны; хромирование не предотвращает и, вероятно, не уменьшает повреждения из-за высокой твердости окисла хрома.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под усталостным изнашиванием?
2. Как проявляется усталостное изнашивание?
3. Какие меры применяют для снижения усталостного изнашивания?
4. Что понимают под адгезионным изнашиванием?
5. Как проявляется адгезионное изнашивание?
6. Какие меры применяют для снижения адгезионного изнашивания?
7. Что понимают под фреттинг-коррозией?
8. Как проявляется фреттинг-коррозия?
9. Какие меры применяют для снижения фреттинг-коррозии?

10. Смазочные материалы, применяемые в парах трения.

- 1) Классификация смазочных материалов.**
- 2) Показатели, характеризующие физико-химические свойства смазочных материалов.**
- 3) Присадки к смазочным материалам.**
- 4) Пластичные смазочные материалы.**
- 5) Основные подходы к выбору смазочных материалов.**

Классификация смазочных материалов

Для снижения трения и изнашивания разнообразных узлов трения в технике широко используют смазочные материалы. Смазочные материалы служат для отвода тепла из зоны трения, для защиты рабочих поверхностей деталей от коррозии, кроме того, они обеспечивают герметизацию узлов трения, очищают детали от загрязняющих отложений, нагара, продуктов износа и т.д. От правильного подбора смазочного материала и его качества во многом зависит долговечность машины.

В зависимости от физического состояния различают: газообразные, жидкие, пластичные и твердые смазки.

В настоящее время наиболее широкое применение в машинах и механизмах нашли жидкие масла.

Масла по происхождению разделяются на минеральные или нефтяные; органические - растительные из семян (каستоровые, горчичные, сурепные); животные (сало, технический рыбий жир, костное, спермацетовые); синтетические.

В промышленности наиболее широкое (до 95 %) применение нашли минеральные масла. По способу получения они могут быть: дистиллятные, полученные вакуумной перегонкой мазута; остаточные, полученные из остатка от вакуумной перегонки мазута - из гудрона; компаундированные, полученные смешиванием дистиллятных и остаточных масел.

Органические - растительные и животные масла обладают высокой смазывающей способностью, но имеют плохую стойкость к действию повышенной температуры. По этой причине в чистом виде их практически не используют, иногда добавляют к минеральным для улучшения смазывающих свойств.

Несмотря на стоимость синтетических масел, их стоимость в 2...4 раза превышает стоимость минеральных материалов, но их применение позволяет резко расширить диапазон рабочих температур и увеличить сроки эксплуатации масла. Широкое применение синтетических углеводородов в компрессорах, редукторах, паровых турбинах приводит к снижению энергозатрат, уменьшению рабочей температуры и, в конечном итоге, к повышению эффективности работы оборудования.

Смазочные масла классифицируют по назначению и области применения:

- моторные, применяемые для двигателей внутреннего сгорания;
- трансмиссионные, применяемые для смазки элементов трансмиссий, транспортных средств;
- индустриальные, применяемые для смазки промышленного оборудования, а также в качестве рабочих жидкостей гидросистем.

Моторные масла используют в двигателях внутреннего сгорания с целью уменьшения трения, износа и превращения задира трущихся поверхностей. Моторные масла подразделяются: по кинематической вязкости, сезонности, типу двигателя и степени его форсирования.

Например, М-8-Г₂: М – моторное; 8 – кинематическая вязкость (мм²/с) при 100 °С; Г₂ – для высокофорсированных дизелей без наддува или с умеренным наддувом, работающие в эксплуатационных условиях, способствующих образованию высокотемпературных отложений.

В обеих вязкостных классификациях (ГОСТ, SAE), чем меньше цифра в числителе с индексом "з" (ГОСТ) или перед буквой "w" (SAE), тем меньше вязкость масла при низкой температуре и соответственно легче холодный пуск двигателя. Чем больше цифра, стоящая в знаменателе (ГОСТ) или после дефиса (SAE), тем больше вязкость масла при высокой температуре и надежнее смазывание двигателя в летнюю жару.

Примерное соответствие классов вязкости моторных масел по ГОСТ 17479.1 – 85 классам вязкости по SAE J-300 представлено в таблице 1.

Таблица 1 - Соответствие классов вязкости моторных масел по ГОСТ 17479.1-85 классам вязкости по SAE J-300

Класс вязкости		Класс вязкости	
ГОСТ 17479.1-85	SAE J 300	ГОСТ 17479.1-85	SAE J-300
3з	5w	24	60
4з	10w	3з/8	5w-20
5з	15w	4з/6	10w-20
6з	20w	4з/8	
6	20	4з/10	10w-30
8		5з/10	15w-30
10	30	5з/12	
12		5з/14	15w-40
14	40	6з/12	20w-30
16		6з/14	20w-40
20	50	6з/16	

Как и моторные, трансмиссионные масла, классифицируют по вязкости и по уровню эксплуатационных свойств.

Классификация по эксплуатационным свойствам согласно API (American Petroleum Institute) предусматривает деление масел на 6 групп в зависимости от области применения (Таблица 2), которая определяется типом зубчатой передачи, удельными контактными нагрузками в зонах зацепления и рабочей температурой.

Группа GL-6 в настоящее время практически не используется. При необходимости область применения группы GL-5 дополняется соответствующей информацией в технической документации на эти масла.

Таблица 2 – Классификация трансмиссионных масел согласно API

Группа	Область применения
GL-1	Цилиндрические, червячные и спирально-конические зубчатые передачи, работающие при низких скоростях и нагрузках
GL-2	Червячные передачи, работающие при низких скоростях и нагрузках
GL-3	Спирально-конические передачи, работающие в умеренно жестких условиях
GL-4	Гипоидные передачи, работающие в условиях высоких скоростей при малых крутящих моментах и малых скоростей при больших крутящих моментах
GL-5	Гипоидные передачи, работающие в условиях высоких скоростей при малых крутящих моментах и ударных нагрузках на зубья шестерен
GL-6	Гипоидные передачи с увеличенным смещением, работающие в условиях высоких скоростей, больших крутящих моментов и ударных нагрузок

Масла для автоматических коробок передач не подчиняются требованиям API. В связи с тем, что к ним предъявляются особые требования, крупнейшие производители этих коробок разработали отдельные спецификации для автоматических трансмиссионных жидкостей - ATF (Automatic Transmission Fluids).

Индустриальные масла представляют группу нефтяных масел более 90 наименований с объемом производства свыше 30 % от общей выработки нефтяных масел. Они предназначены для смазывания металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, насосов, приборов, гидросистем и др.

По назначению их делят на 4 группы: Л - для легконагруженных узлов трения; Г - для гидравлических систем;

Н - для направляющих скольжения; Т - для тяжело нагруженных узлов трения (зубчатые передачи). По эксплуатационным свойствам и составу индустриальные масла делят на четыре группы, обозначаемых буквами: А - без присадок; В - с антиокислительными и антикоррозионными присадками; С - дополнительно с противоизносными присадками; Д - дополнительно с противоскачковыми присадками. Эти масла имеют 18 классов вязкости. Маркировка масел включает перечисленные индексы. Например, И-Г-А-32 означает индустриальное масло для гидравлических систем, без присадок, 32-й класс вязкости ($\nu = 29 \dots 35 \text{ мм}^2/\text{с}$).

Показатели, характеризующие физико-химические свойства смазочных материалов

Физико-химические свойства смазочных материалов (СМ) - это регламентированные стандартами показатели для оценки качества масел.

Таковыми показателями являются:

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

Все показатели прямо или косвенно характеризуют поведение СМ в эксплуатации либо служат для контроля их качества при производстве, транспортировании и хранении.

Масла представляют собой смесь различных компонентов, каждый из которых выполняет определенные функции. Обычно 90 % объема приходится на долю базового масла, остальные 10 % различные присадки и наполнители. В качестве базовых масел широко применяются минеральные (нефтяные), синтетические и жировые масла.

Наибольшее распространение получили нефтяные масла. Синтетические масла пока дорогие и поэтому применяются только для специальных видов техники. Жировые масла растительного или животного происхождения самостоятельно почти не используются. Их применяют в качестве присадок к нефтяным маслам.

Присадки к смазочным материалам

Присадки - это различные химические соединения, составляющие незначительную долю (0,002...5 %), но резко улучшающие свойства масел (касторовое, вазелиновое масла, глицерин, олеиновая, стеариновая кислоты и т.д.).

По своему назначению присадки разделяются на:

- моющие - для удаления продуктов окисления масла с поверхности трения;
- противоокислительные - для замедления процессов окисления масел;
- противозадирные - для образования прочных пленок на трущихся поверхностях, которые препятствуют схватыванию;
- антикоррозийные - для защиты металлов от коррозии;
- антифрикционные - для уменьшения величины коэффициента трения (животные и растительные жиры, соединения серы, соединения фосфора и т. д.);
- противоизносные - для уменьшения износа поверхностей (соли бария, цинка и др.);
- многофункциональные.

В последнее время большое внимание исследователей привлекают многофункциональные или так называемые

трибополимеризующие присадки, создающие одновременно противоизносные, противозадирные, антифрикционные действия. Они образуют полимерные пленки на поверхностях трибосопряжений. За этими присадками будущее.

Пластичные смазочные материалы

Пластичные смазки представляют собой минеральные масла, загущенные мылами, т.е. солями растительных, животных и синтетических жирных кислот. В зависимости от состава мыла пластичные смазки разделяются на кальциевые, натриевые, кальциево-натриевые, алюминиевые, магниевые и др.

Кальциевые смазки и солидолы (униол-1, униол-4) в воде не растворяются, при плавлении теряют содержащуюся в них свободную и связанную воду и начинают распадаться на масло и мыло; после охлаждения солидола его смазочные свойства не восстанавливаются. Кальциевые смазки не могут длительно работать при температуре 55 °С и выше без пополнения.

Натриевые пластичные смазки (ДТ-1) более термостойки, они плавятся при температуре 100...200 °С, но не влагостойки. После расплавления, и при охлаждении они восстанавливают свои свойства. Натриевые пластичные смазки легко растворяются в воде, выделяя свободные жирные кислоты и щелочи, вызывающие коррозию металла, и образуют легко смываемую с трущихся поверхностей эмульсию.

К кальциево-натриевым смазкам относят № 1-13 УТВ (ГОСТ 1631 – 52), ИП 1 (ГОСТ 3257 – 53). Поскольку смазки этого вида содержат кальциевые мыла, то они менее чувствительны к влаге по сравнению с чисто натриевыми смазками, в связи с чем их можно широко применять в условиях повышенной влажности.

Литиевые смазки (литол-24, фиол-1, фиол-2у, шрус-4 и др.) обладают высокими антифрикционными свойствами и широко используются как единая смазка в основных деталях автомобиля.

Преимущества пластичных смазок: хорошая работоспособность при малых скоростях скольжения и высоких

удельных давлениях, при действии ударных и знакопеременных нагрузок, при частых остановках, а у специальных смазок - и при высоких температурах; возможность работы соединений при более высоких значениях зазоров; хорошее удерживание в корпусах, хорошее заполнение зазоров в узлах трения и неплотностей корпусов подшипников, что препятствует загрязнению поверхностей трения.

Основные подходы к выбору смазочных материалов

Выбор зависит от многих условий, основными из которых являются: конструкция узла трения, рабочий режим (нагрузка, скорость, температура), особенности рабочего и технологического процесса, внешняя среда (температура воздуха, его влажность, запыленность, наличие агрессивных газов и т.п.), требования надежности и экономические факторы.

Преимущества смазочных масел по сравнению с пластичными смазками следующие: более высокая стабильность и чистота; более низкий коэффициент внутреннего трения; лучшая работоспособность при высоких скоростях скольжения, при повышенных и при низких температурах; возможность фильтрации; возможность контроля за состоянием масла и его подачи; простота добавки и смены масла; возможность сбора отработанного масла и его регенерации. Особенно важным преимуществом является охлаждающее действие масел.

Недостатки смазочных масел: повышенные утечки через неплотности в разъемах корпусов и соединений маслопроводов; необходимость применения сложных уплотнений; повышенная пожароопасность.

Преимущества пластичных смазок: хорошая работоспособность при малых скоростях скольжения и высоких давлениях, при действии ударных и знакопеременных нагрузок, при частых остановках, а у специальных смазок - и при высоких температурах; возможность работы сопряжений при больших зазорах; хорошее удерживание в корпусах; хорошее заполнение зазоров в узлах трения и неплотностей корпусов подшипников, что препятствует загрязнению поверхностей трения.

Однако в пластичных смазках, возможно их расслоение,

расплавление и вытекание при длительной работе в условиях повышенных температур. Смена пластичных смазок требует таких трудоемких процессов, как разборка и промывка механизмов.

Пластичные смазки применяют в парах скольжения тихоходных механизмов, в открытых зубчатых передачах и подшипниках качения, а также там, где можно избежать усложнения конструкции узла, связанного с использованием жидкого смазочного материала. Однако при высоких скоростях скольжения или частотах вращения при использовании пластичных смазок возникают большие потери на трение, что повышает температуру смазки. Кроме того, при высоких частотах вращения происходит отбрасывание смазки от рабочих поверхностей. Внутреннее трение повышается также при низких температурах; это может вызвать заклинивание и нарушение нормального функционирования узла. Пластичные смазки при использовании в приборах и механизмах управления могут не удовлетворять требованиям их чувствительности. Применение этих смазок не всегда возможно в узлах, не допускающих разборки и рассчитанных на длительную эксплуатацию. Все эти обстоятельства ограничивают область применения пластичных смазок.

В отношении жидких смазок отметим следующее:

- для механизмов, работающих в теплых помещениях, применимы масла со сравнительно высокой температурой застывания;

- чем меньше вязкость масла, тем меньше внутреннее трение;

- при сравнительно узком температурном интервале работы механизма масла могут иметь крутую вязкостно-температурную характеристику;

- маловязкие масла в случае нарушения плотности стыков и соединений дают большие утечки и легко разбрызгиваются;

- нагрузочная способность масел повышается с увеличением их вязкости.

Малые потери на трение при смазывании маловязкими жидкостями повышают КПД механизма, а также снижают

температуру нагрева деталей, что иногда существенно, как, например, в станках для отделочных операций. Так, подшипники скольжения шпинделей шлифовальных станков смазывают смесью минерального масла с керосином или даже чистым керосином.

С увеличением нагрузки и рабочей скорости смазка приобретает значение для теплоотвода. Вязкость смазки, применяемого для смазывания подшипников, должна соответствовать нагрузке: чем меньше нагрузка, тем меньше должна быть вязкость для максимального снижения потерь на трение и предупреждения чрезмерного нагрева подшипника. С увеличением скорости вязкость смазки должна снижаться. С учетом температурного фактора вязкость должна выбираться такой, чтобы при эксплуатационной температуре рабочая вязкость смазки не оказалась недостаточной.

Применение масел с противозадирными присадками для подшипников качения нецелесообразно, так как при наличии сепараторов из медных сплавов такие масла вызывают коррозию и, кроме того, некоторые присадки стимулируют изнашивание и выкрашивание рабочих поверхностей тел качения и колец.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют смазочные материалы по назначению?
2. Как классифицируют моторные масла?
3. Как классифицируют трансмиссионные масла?
4. Как классифицируют промышленные масла?
5. Какие показатели характеризуют физико-химические свойства масел?
6. Каково назначение присадок?
7. Как классифицируют пластичные смазочные материалы?
8. Какие основные правила выбора смазочных материалов?

11. Конструктивные материалы, применяемые в парах трения.

- 1) Материалы, применяемые в трибосопряжениях.**
- 2) Правила сочетания материалов.**
- 3) Методика подбора материалов трибосопряжений.**

Материалы, применяемые в трибосопряжениях

Детали узлов трения в зависимости от их функционального назначения изготавливают из износостойких (материалы в виде слоев, накладок пластин, диски фрикционных муфт), антифрикционных (чугун, бронза, латунь, баббит) и фрикционных (ферродо-, металлокерамика, а именно текстолит, фибра, чугун, стали 46, 47, марганцевая сталь) и конструкционных материалов (стали 45, 40ХН).

Условно принято называть материалы с коэффициентом трения $f > 0,2$ - фрикционными, а $f < 0,2$ - антифрикционными.

Фрикционные материалы применяются в тормозах, муфтах сцепления, фрикционных механизмах, ременных и канатных передачах, на транспорте в виде колеса или рельса.

Антифрикционные материалы используются в подшипниках скольжения, направляющих, в системе поршневые кольца-цилиндр, электрических (часто размыкающихся) контактах и других устройствах.

На практике существуют следующие виды фрикционных материалов: металлические, асбокаучуковые, асбосмоляные, органические, металлокерамические. Контртелом обычно служат прошедшие термообработку стали с высоким содержанием углерода и легированные, а также чугун.

К металлическим фрикционным материалам относятся серые чугуны, работающие обычно в паре с высокоуглеродистыми сталями типа У7, У8. В чугунах содержится углерод в виде графита, который вместе с продуктами износа создает на контакте пленку, обладающую пониженным сопротивлением сдвигу. Недостатком таких пар является сравнительно малый коэффициент трения, а достоинством - низкая стоимость. Указанная пара применяется в тормозах колес железнодорожного транспорта.

Асбестокаучуковые материалы широко применяются в муфтах сцепления, тормозах автомобилей, тракторов и других машин. В их состав входят: асбест, каучук, сурик железный, сера, оксид цинка, свинец, латунная стружка, канифоль и др. Асбест, обладая волокнистой структурой, создает каркас изделия и весьма теплостоек. Его коэффициент трения обычно составляет 0,7...0,8 и мало зависит от температуры. Однако у этих материалов коэффициент трения уменьшается при температурах свыше 200...250 °С из-за размягчения каучука. Вторым недостатком является также то, что при температуре порядка 400 °С материал вспыхивает (горит каучук).

Асбестосмоляные материалы, в отличие от асбестокаучуковых, имеют связующее в виде синтетических смол, например, эпоксидной. С ростом температуры коэффициент трения таких материалов падает с $f = 0,7$ при нормальных условиях до 0,25 при 400...500 °С, затем возрастает. Типичными асбестосмоляными материалами являются ретинаксы (ФК-24А, ФК-16Л), в которые вводится латунная проволока, улучшающая структуру промежуточного слоя.

Применяется ретинакс в тяжело нагруженных тормозах (буровые лебедки, авиаколеса). Общим недостатком асбестокаучуковых и асбестосмоляных фрикционных материалов является наличие асбеста, т. к. он является экологически опасным материалом.

Органические фрикционные материалы (дерево, кожа, пробка, резина) применяются в слабонагруженных узлах трения, чаще - в приборах. Общим недостатком этих материалов является низкая теплопроводность, теплостойкость, высокая стоимость и низкая нагрузочная способность.

Металлокерамические материалы получают методом порошковой металлургии: прессованием с последующим спеканием или наплавкой порошковой проволоки, взрывом. Такие материалы весьма теплостойки, т.к. основа их может быть медная и железная. Однако они склонны к схватыванию и имеют резко выраженную падающую характеристику, т.е. с увеличением температуры резко падает коэффициент трения

Существуют следующие виды антифрикционных материалов: металлические, природные, полимерные, самосмазывающие композиции и металлокерамические.

Среди металлических наиболее известные - баббиты (названы в честь автора этих сплавов - Баббита). Первые баббиты - это сплав олова, сурьмы и меди, затем - баббиты на основе свинца с добавлением меди, сурьмы, мышьяка, кадмия, никеля. Наиболее широко применялись и сейчас применяются для вкладышей баббиты типа Б-83 (83 % олова, остальные - сурьма и медь) для давлений до 10 МПа, окружных скоростей до 50 м/с и рабочих температур до 70 °С, они очень хорошо прирабатываются и имеют коэффициент трения $f < 0,005$ со смазкой.

Сплавы на основе меди: бронза - это сплав меди с оловом, латунь - сплав меди с цинком. Бронзы до настоящего времени являются основными материалами тихоходных подшипников скольжения, венцов червячных зубчатых колес. Латунни используются реже.

К антифрикционным чугунам относятся: серый чугун с пластинчатым графитом, модифицированные чугуны с глобулярным графитом, ковкие чугуны, обладающие высокой пластичностью. С повышением содержания графита повышаются антифрикционные свойства чугуна. Недостаток - низкая износостойкость и высокий коэффициент трения.

К числу природных антифрикционных материалов относятся: древесина, драгоценные камни и т. д. Драгоценные камни успешно применяются в качестве опор скольжения в часовой промышленности. Они имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Представителем антифрикционных полимеров является фторопласт. Фторопласт химически инертен, не способен сорбировать влагу, обладает высокой пластичностью, низким модулем упругости и очень низким коэффициентом трения. Он теплостоек и термoplastичен. Из металлофторопластовой полосы изготавливают вкладыши подшипников скольжения.

В самосмазывающиеся материалы включают обычно в качестве основного компонента графит и дисульфиды металлов и

другие соединения. Все перечисленные твердые смазки имеют слоистое строение. Поэтому их слои легко скользят относительно друг друга.

Антифрикционная металлокерамика обладает малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью, может работать без смазки в условиях загрязнения твердыми частицами. Выпускаются пористые сплавы на основе железа и графита (железографит), бронзы и графита, алюминия и графита, а также серебра и меди с графитом и др. Вместо графита могут использоваться и другие твердые (слоистые) смазки: молибденит, диселениды металлов, нитрид бора.

Правила сочетания материалов

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

Сочетать твердый металл с твердым (сочетание пар из азотированной, хромированной и закаленной стали). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей. Нанесение приработочных покрытий повышает надежность пар в наиболее опасный период работы - во время приработки. Применение этих пар ограничивается скоростями скольжения.

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

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

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

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

Учитывать возможность при эксплуатации наводороживания поверхностей трения, что резко снижает износостойкость и надежность работы узла трения. Применять материалы, трудно поддающиеся наводороживанию.

Методика подбора материалов трибосопряжений

Выбор материалов для изготовления деталей узла трения представляет собой весьма сложную задачу, поскольку их выбор должен осуществляться с учетом довольно большого числа факторов. К ним, в частности, относятся: уровень статической и динамической нагрузок, скорость относительного перемещения трущихся тел, температура в зоне трения, свойства смазочного материала и сопрягаемого тела, вид трения, конструкция узла. Материал должен также удовлетворять требованиям по износостойкости и коэффициенту трения, обладать хорошими прирабатываемостью, совместимостью и низкой стоимостью.

Выбору материала при проектировании ТС предшествуют прочностные расчеты (на изгиб, контактную прочность, на заедание, на износостойкость и др.).

На рисунке 12 представлена схема выбора материала для трибосопряжения.

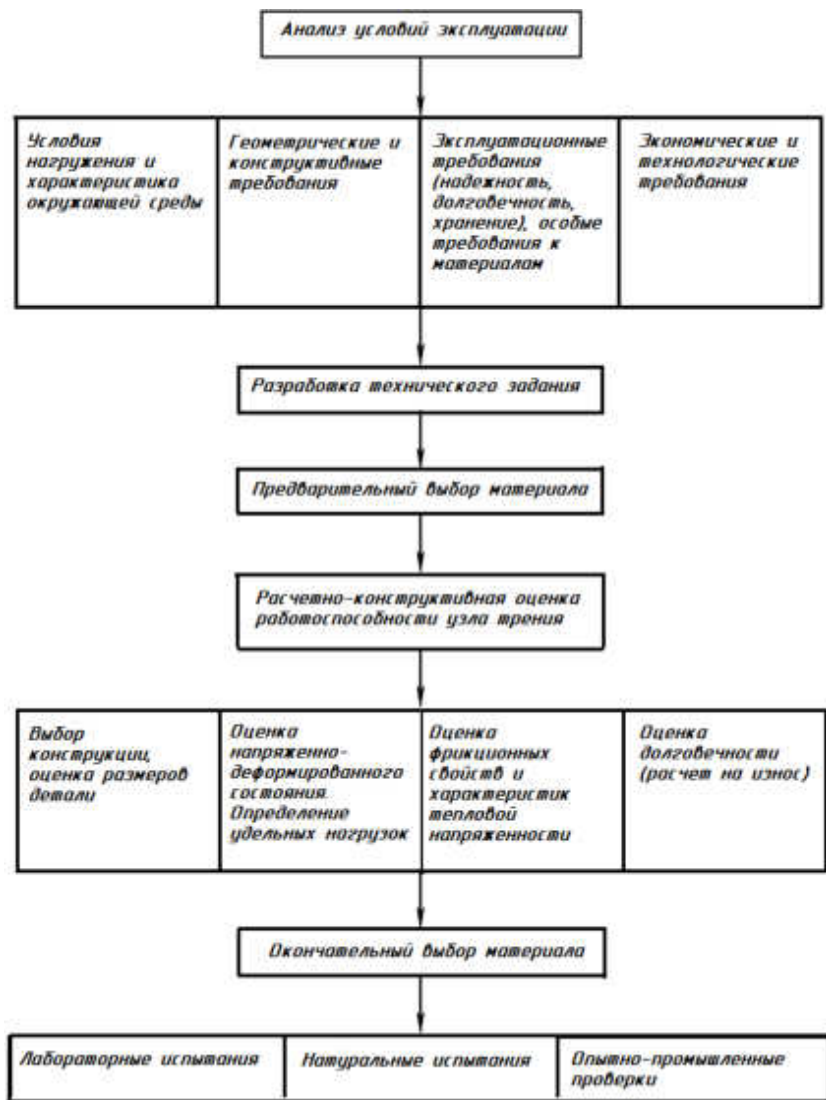


Рисунок 12 – Схема выбора материала для трибосопряжения

Анализ условий эксплуатации

При учете условия нагружения и характеристики окружающей среды внимание уделяют таким параметрам как: нагрузка и место ее приложения; частота вращения (скорость скольжения); режим нагружения (статический, динамический и т. д.); ускорение; атмосферные условия (влажность и т. д.); температура; вид рабочей среды и ее концентрация; электрические воздействия; возможность попадания инородных частиц (абразив и т.д.).

Геометрические и конструктивные требования: габариты узла; требуемая точность; особые требования к конструкции узла (взаимодействие с другими узлами и т.д.).

Эксплуатационные требования: показатели надежности; срок службы; необходимость и возможность контроля за работой узла; энергоемкость; коэффициент трения; шум; демпфирование; токсичность; ионизирующие излучения; газовыделение; условия хранения.

Экономические и технологические требования: объем производства; стоимость готового изделия; затраты энергии на производство; производительность оборудования; масса изделия; внешний вид и отделка; другие сведения.

На основе анализа условий эксплуатации составляется техническое задание на проектирование узла трения (детали).

Предварительный выбор материалов

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

Расчетно-конструктивная оценка работоспособности узла трения

Прежде всего, определяют оптимальные габариты узла трения и его конструкцию. Важным элементом геометрического расчета является установление зазоров в сопряжениях. Следует помнить, что повышенные требования к точности связаны с опасностью заклинивания при нагреве. Далее определяют нагрузочную способность детали (рассчитывают на прочность и

деформацию), а затем оценивают фрикционные характеристики сопряжения (рассчитывают коэффициенты трения, определяют тепловую напряженность). И в последнюю очередь производят проверку узла трения на долговечность (рассчитывают интенсивность изнашивания). По результатам расчетов ведется конструктивная корректировка и доработка узла трения.

Окончательный выбор материала

Отобранные в результате предварительных оценок и расчетов материалы деталей пары трения необходимо экспериментально исследовать. Вначале проводят лабораторную оценку материалов на образцах, основывающуюся на применении по возможности стандартизированных методик и оборудования, выборе схем взаимодействия образцов и режимов трения, близких к эксплуатационным, в соответствии с методами моделирования. Следующий этап - испытание натуральных образцов в условиях, наиболее близко имитирующих эксплуатационные. На основании испытаний натуральных образцов решается вопрос о проведении опытно-промышленной проверки.

Опытно-промышленная проверка служит основным критерием окончательного выбора материала для деталей узла трения.

Контрольные вопросы

1. Какие конструкционные материалы относят к фрикционным?
2. Какие конструкционные материалы относят к антифрикционным?
3. В каких узлах применяют фрикционные материалы?
4. В каких узлах применяют антифрикционные материалы?
5. Какие основные правила сочетания конструкционных материалов?

12. Конструктивные методы повышения износостойкости

Существует большое количество конструктивных решений, направленных на обеспечение износостойкости деталей машин.

Рассмотрим отдельные из них.

1) Замена внешнего трения на внутреннее трение.

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

Резина легко вулканизуется к стали, чугуну, латуни и алюминиевым сплавам. Наиболее прочно резина скрепляется с латунями определенного состава.

Резинометаллические шарниры нашли применение в узлах подвески автомобилей и тракторов, в мягких карданах, в гусеницах тягачей, сочленениях вагонных и локомотивных рам с их поворотными тележками и т.п. По сравнению с обычными резинометаллическими шарниры имеют следующие преимущества:

- противостоит абразивному изнашиванию;
- отпадает необходимость в смазывании и установке уплотняющих устройств;
- уменьшается масса;
- амортизируются удары;
- при резком увеличении крутящего момента происходит гашение вибраций и демпфирование крутильных колебаний.

2) Оценка и выбор схемы узла трения.

При конструировании деталей машин необходимо:

- предпочитать обратную пару трения прямой паре трения;
- рационально организовывать смазку трибосопряжений;
- обеспечивать возможность регулирования зазоров в трибосопряжениях;

- предусматривать возможность оперативной замены быстроизнашивающихся деталей;
- по возможности увеличивать толщину деталей в запас на износ;
- учитывать возможные температурные деформации деталей узлов трения и этим самым исключать возможность схватывания и заедания деталей в трибосопряжении.

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

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

$$H_1 < H_2; S_1 < S_2,$$

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

Пару с расположением материалов, удовлетворяющим первому условию, называют прямой парой трения, а удовлетворяющим второму условию – обратной парой. В случае прямой пары трения по большей поверхности скользит более твердое тело, а в случае обратной пары – более мягкое тело. Примерами прямой пары являются скольжение закаленного суппорта по чугунной термически не обработанной станине и скольжение хромированного поршневого кольца по поверхности цилиндра из перлитного чугуна. Обратной парой будет хромированное рабочее зеркало цилиндра и чугунное кольцо. Вал и подшипник с баббитовым слоем при нагрузке постоянного направления, приложенной к вращающемуся валу, представляют собой обратную пару.

Опыт эксплуатации машин, стендовые испытания трущихся деталей и лабораторные исследования показывают, что обратные пары трения более стойки к заеданию, а при наличии заедания имеют меньшие повреждения поверхностей.

На долговечность и надежность работы узлов трения благоприятное влияние оказывает жесткость, податливость и специальная конфигурация деталей.

3) Выбор материалов для трибосопряжений (более подробно данный метод описан в лекции 10, пункт «Правила сочетания материалов») Не рекомендуется сочетать в трибосопряжении мягкий материал с мягким и одноименные по природе материалы. Наоборот, рекомендуется сочетать твердый

материал с мягким. Если реализовать такую пару трения невозможно, то отдавать предпочтение сочетанию твердого материала с твердым, но в этом случае приработку (обкатку) узла трения проводить на облегченном по нагрузке режиме. Целесообразно применять, где это возможно, полимеры и металлокерамику. Это будет снижать расход дефицитных материалов, массу деталей, и понижать вибрацию и уровень шума при работе машины.

4) Замена трения скольжения трением качения

Потери энергии в условиях трения скольжения значительно выше, чем при реализации трения качения. Поэтому необходимо там, где это возможно, использовать в конструкции узлов трения подшипники качения, которые по сравнению с подшипником скольжения имеют следующие преимущества:

- малые потери на трение по сравнению с потерями у подшипников скольжения, работающих при граничной смазке или даже при жидкостной смазке. Статический момент подшипника лишь на 30...50 % превышает момент трения при установившемся движении, в то время как в подшипниках скольжения это превышение достигает 15 раз и более;

- меньший расход цветных металлов (при изготовлении подшипников скольжения применяют такие металлы как медь, олово, свинец);

- простота обслуживания и малый расход смазочных материалов;

- высокая степень стандартизации и комплектная поставка шарико - и роликоподшипников упрощает конструирование подшипниковых узлов и уменьшает стоимость в связи с их массовым производством;

- существенное уменьшение изнашивания шеек валов при правильно назначенных посадках.

Однако замена подшипников скольжения на подшипники качения имеет следующие недостатки:

- пониженная долговечность при высоких окружных скоростях и динамических нагрузках;

- большие диаметральные размеры при меньшей длине, чем у подшипников скольжения;

- неудовлетворительная работа в условиях вибрационной нагрузки, а также при движении с малыми углами поворота;
- большая чувствительность к запыленности абразивом и к загрязнению смазочного масла, чем у подшипников скольжения.
- значительно меньшая грузоподъемность и долговечность упорных подшипников качения по сравнению с подшипниками скольжения;
- трудности в изготовлении подшипников в случаях, когда для удобства монтажа либо ввиду особенностей конструкции вала требуются разъемные опоры. Например, при ремонте тракторных двигателей устанавливали на шатунные шейки роликовые, преимущественно игольчатые, подшипники с кольцами, имевшие шевронные разъемы;

5) Использование принципа податливости.

Податливость детали позволяет ее рабочей поверхности следовать за деформацией сопряженной детали и приспособляться к неточностям ее геометрической формы. Самоустанавливающийся опорный подшипник является простейшим примером конструкции, имеющей деталь свободной податливости в виде вкладыша, обладающего угловой подвижностью. Полнее роль податливости проявляется в резинометаллических вкладышах и гуммированных деталях, во вкладышах из пластмасс и мягких покрытиях рабочих поверхностей.

Сухая резина имеет коэффициент трения выше, чем у других материалов, и в то же время в паре со сталью, бронзой и латунию при смазывании такой маловязкой жидкостью, как вода, имеет высокие антифрикционные свойства. Это объясняется тем, что гибкая и легко деформирующаяся резина хорошо приспособляется к неровностям поверхности вала без нарушения в зоне нагружения непрерывности смазочного слоя.

Резинометаллические вкладыши устанавливают в соответствующих устройствах морских и речных судов, в центробежных песковых насосах, артезианских насосах, гидравлических турбинах, турбобурах и т. п.

Такие композитные детали хорошо сопротивляются гидроабразивному или газоабразивному износу, коррозии и эрозийным разрушениям. Их масса в несколько раз меньше

чисто металлических, а применение в сборочных единицах уменьшает вибрацию в механизмах и снижает уровень производственного шума.

б) Защита рабочих поверхностей пар трения от загрязнений.

Многие машины и механизмы работают в запыленной или загрязненной среде; в узлы трения попадают абразивные частицы. На открытые поверхности трения технологических машин возможно попадание окалины, ржавчины, металлической или иной стружки, а в числе абразивных частиц – весьма твердых окислов алюминия.

Смазывание поверхностей при работе в запыленной атмосфере в отсутствие защиты во много раз усиливает изнашивание, так как к таким поверхностям прилипает абразив.

Защиту от загрязнения можно подразделить на защиту открытых узлов трения; герметизацию закрытых корпусов в местах выхода валов или других подвижных деталей; очистку смазывающего масла; удаление загрязнений из топлива, смазки, воздуха, а также газов и жидкостей, поступающих во внутренние полости машины.

7) Равностойкость изнашивающихся деталей.

Неравномерность изнашивания, сосредоточение наибольших мест износа на каком-либо участке изнашиваемой поверхности, повышенная скорость изнашивания одной из деталей трибосоприятия приводят обычно к преждевременной потере работоспособности всего агрегата при неполном использовании ресурса остальных деталей.

В качестве примера неравномерного изнашивания профиля можно привести затупление лезвий различных режущих инструментов. Устранить такой недостаток можно конструктивно - технологическими приемами, обеспечивающими определенную степень равномерности профиля лезвия, т.е. его самозатачиванием.

Долговечность таких ножей в 6...12 раз выше долговечности однослойных ножей обычной конструкции.

8) Самоорганизация геометрической формы.

Изыскание оптимальной формы занимает важное место при конструировании деталей. Первоначальная форма и ее изменения в процессе изнашивания влияют на

работоспособность деталей. В то же время темп износа отдельных деталей после приобретения ими формы естественного износа замедляется многократно.

Такой эффект по износостойкости был получен у цилиндрических и конических зубчатых колес путем обработки концов зубьев и придания им бочкообразной формы. Бочкообразная форма зуба не только способствует увеличению долговечности передачи, но и уменьшает шум во время работы.

9) Избирательный перенос.

Другой формой самоорганизации в узлах трения является избирательный перенос. Это явление было обнаружено в парах трения сталь-бронза при использовании глицириновой смазки, а также в паре сталь-сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслореоновой смесью. Исследования Д.Н. Гаркунова и практика показывают, что медная пленка в паре бронза-сталь образуется в результате анодного растворения бронзы глицерином. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо и др.) уносятся в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. В то же время стальная поверхность также покрывается тонким слоем меди. После того как медная пленка покроет бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой («вытягивать» атомы легирующих элементов), процесс растворения бронзы прекращается и наступает установившийся режим избирательного переноса. В этих условиях медная пленка, ее называют сервовидной, как мягкий материал работает по мягкому. Нагрузка в этом случае распределяется равномерно по поверхности трения и имеет небольшую величину на единице площади, что способствует резкому снижению интенсивности изнашивания трибосопряжения и, в целом, повышению ресурса узла трения.

10) Использование принципа плавающих деталей.

Сочленение поршневого пальца с шатуном производят: закреплением пальца в бобышках поршня или в шатунной головке; установкой пальца с возможным поворотом, как в бобышках поршня, так и в шатунной головке. Палец такой

конструкции называется плавающим. При работе механизма плавающий палец под действием сил трения со стороны шатуна поворачивается. Угловое перемещение шатуна складывается из углового перемещения относительно пальца и поворота пальца в бобышках, поэтому скорость пальца в каждом из этих перемещений примерно вдвое меньше, чем при закрепленном пальце. Во столько же раз уменьшается и тепловыделение в каждом из сопряжений пальца. Снижается скорость изнашивания пальца и вкладышей, а износ поверхности пальца распределяется равномерно. Однако наиболее важным преимуществом плавающего пальца является высокая надежность узла: палец, заевший в шатуне, может вместе с ним качаться в бобышках поршня, а палец, заевший в бобышках, не препятствует качанию шатуна.

Контрольные вопросы

1. Какие конструктивные методы применяют для повышения износостойкости деталей машин?
2. Каким образом можно реализовать метод замены внешнего трения на внутреннее?
3. В чем отличие прямой и обратной пар трения?
4. Каковы достоинства и недостатки подшипников скольжения и качения?
5. В чем заключается использование принципа податливости?
6. Что понимают под самоорганизацией геометрической формы деталей?
7. Где используют принцип плавающих деталей?

13. Технологические методы повышения износостойкости

Весьма важное значение в повышении износостойкости деталей машин имеют технологические методы. В основе этих способов лежит создание фрикционных поверхностей деталей с заданными свойствами, которые уменьшали бы склонность к схватыванию и износу.

1) Термическое упрочнение поверхностей трения. Различают три основных вида термической обработки: отжиг, закалку и улучшение.

Отжиг - вид термической обработки металлов и сплавов, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке и последующем, обычно медленном, охлаждении. При отжиге осуществляются процессы возврата (отдыха металлов), рекристаллизации и гомогенизации. Цели отжига - снижение твёрдости для повышения обрабатываемости, улучшение структуры и достижение большей однородности металла, снятие внутренних напряжений.

Диффузионный отжиг преследует цель путем длительного нагрева выровнять неоднородности химического состава сплава, особенно ликвационного характера. Посредством диффузионного отжига в первую очередь достигают выравнивания различия в содержании легирующих элементов, обусловленного внутрикристаллитной ликвацией.

Отжиг для снятия напряжений, возникающих при сварке и холодном деформировании, осуществляют в интервале температур 450...650 °С, но не выше температуры отпуска при предшествовавшем улучшении. После отжига целесообразно проводить медленное охлаждение, чтобы свести к минимуму новые напряжения.

Закалка. Закалка представляет собой процесс охлаждения заготовки из температурной области твердого раствора с такой скоростью, что превращение в перлитной и промежуточной областях оказывается подавленным и образуется мартенсит. Сталь переходит в состояние наибольшей возможной твердости. Различают: нормальную закалку, применяемую при обработке средне- и высокоуглеродистых сталей, и закалку после химико-

термической обработки (цементации высокотемпературного цианирования) применяемую для сталей с относительно низким содержанием углерода.

При закалке возникают значительные напряжения, обусловленные неравномерностью пластических деформаций при охлаждении или нагревании заготовки (деформационные напряжения); изменениями объема, возникающими при превращении (фазовые напряжения); искажением атомной решетки при мартенситных (или подобных) превращениях (структурные напряжения). Напряжения разного рода находятся в сложном соотношении, которое в конечном итоге обуславливает сопротивляемость усталости и изнашиванию. Следствием напряженного состояния могут быть закалочные трещины и коробление заготовок.

Улучшение стали, вид термической обработки стали, заключающийся в закалке и последующем высоком отпуске (при 550...650 °С). В результате улучшения достигается однородная и дисперсная структура сорбита, обеспечивающая хорошее сочетание прочности, пластичности, ударной вязкости и критической температуры перехода из вязкого состояния в хрупкое. Наибольший эффект наблюдается в том случае, если при закалке не образуются немартенситные продукты превращений аустенита (феррит, бейнит). Для предотвращения развития отпускной хрупкости во многих случаях после высокого отпуска необходимо охлаждение в масле или воде.

В ряде случаев целесообразно упрочнять только поверхностные слои. Тогда нагревают до закалочной температуры только этот поверхностный слой, а сердцевина остается незакаленной. Наиболее распространенными методами поверхностной закалки являются газопламенный и особенно электроиндукционный (ТВЧ). Регулируя скорость движения индуктора, подводимую тепловую энергию и скорость охлаждения, изменяют глубину и качество закаленного слоя. Поскольку расходуется энергия лишь на нагрев тонких слоев заготовки, поверхностная закалка экономичнее объемной.

2) 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, производимая в твердых, жидких и газовых средах, 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 поверхностных слоев металлов, обогащенных химическими соединениями с активными элементами, которые предотвращают схватывание и задиры при трении (сульфидирование, сулфоцианирование, селенирование, теллурирование, обработка в йодисто-кадмиевой соляной ванне). Действие этих видов обработки заключается в снижении коэффициента трения и локализации начинающегося задира (при этом твердость поверхности почти не меняется).

Цементацию применяют для низкоуглеродистой нелегированной и легированной стали с содержанием 0,08...0,30 % углерода. Концентрация углерода в поверхностном слое толщиной 0,15...2,0 мм после цементации обычно 0,8...1,0 % Поверхностная твердость после цементации с последующим низким отпуском составляет HRC 58...64.

После цементации и закалки детали из легированной стали рекомендуется подвергать поверхностному наклепу, в результате чего остаточный аустенит превращается в мартенсит.

После термообработки цементованный слой имеет структуру игольчатого мартенсита с мелкими глобулами карбидов и небольшим количеством остаточного мартенсита, для которой характерна высокая износостойкость. Наиболее широко осуществляется цементация в твердом, жидком и газообразном карбюризаторах при температуре 950...980 °С.

Азотирование обогащает нитридами поверхностный слой на глубину 0,25...0,7 мм, что повышает износостойкость, сопротивляемость эрозии и кавитации, Азотируют обычно ответственные детали из низколегированных и легированных сталей (детали турбин, штоки клапанов, гильзы цилиндров ДВС,

втулки, пальцы, валики, зубчатые колеса, клапаны, шатуны, болты, плунжеры, втулки и др.). Азотированию подвергаются детали при более низкой, чем при цементации, температуре 520...560 °С.

Цианирование - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 820...950 °С в расплаве цианида натрия или других солей. Цианирование применяют для повышения износостойкости и коррозионостойкости деталей. Процесс цианирования по сравнению с процессом цементации требует гораздо меньше времени для получения слоя заданной толщины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы.

Борирование проводят преимущественно с целью повышения износостойкости (в условиях сухого трения, скольжения со смазкой и без смазки, абразивного изнашивания, фреттинг-коррозии и т.п.). Борирование повышает также коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов во многих агрессивных средах и жаростойкость при температурах ниже 850 °С. Борирование чаще всего проводят при электролизе расплавленной буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$).

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов, дисков пяты турбобура, вытяжных, гибочных и формовочных штампов, деталей прессформ и машин литья под давлением.

Сульфидирование и сульфоцианирование. Сульфидирование, обычно проводимое в солевых ваннах, дает значительный противозадирный эффект и снижает коэффициент трения.

При сульфоцианировании (одновременном насыщении поверхностей нитридами и сульфидами) достигается повышение как противозадирных свойств поверхностей, так и их износостойкости.

3) Нанесение износостойких покрытий. Для повышения износостойкости изделий применяют гальванические покрытия – хромирование, осталивание, никелирование.

Хромирование. Хромовое покрытие, наносимое на поверхность деталей гальваническим способом толщиной 0,1...0,2 мм, имеет высокую твердость (НВ 1000...1100), низкий коэффициент трения, что значительно снижает тепловыделение

при трении. Износостойкость твердого гладкого хромового покрытия в 5...15 раз выше, чем стальных деталей.

Хромированные детали хорошо работают в паре с баббитами, мелкозернистым чугуном или с деталями из мягких и среднезакаленных сталей при наличии смазки и не слишком высоком давлении. Не рекомендуется хромировать детали, работающие в паре с титановыми сплавами.

Хромирование не заменяет закалку и цементацию. Более того, для повышения износостойкости закаленных и цементованных сталей их также хромируют. Хромирование применяют также для восстановления изношенных деталей.

Износостойкое никелирование. Это покрытие имеет меньшую твердость, чем хромовое, однако оно хорошо обрабатывается и имеет большую вязкость при толщине слоя до 2 мм. Кроме того, никелирование – менее дорогой и более производительный процесс, чем хромирование.

Хорошими антифрикционными свойствами обладают электролитические покрытия из твердого фосфористо-никелевого сплава. 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 при работе по фосфористо-никелевому покрытию в 4...5 раз меньше, чем при работе по стали, и на 20...40 % меньше, чем при работе по хрому.

Твердым никелированием упрочняют и восстанавливают такие детали, как шпиндели металлорежущих станков, поршневые пальцы, коленчатые валы, гильзы цилиндров и др.

4) Электромеханическая обработка (ЭМО). Сущность ЭМО заключается в том, что на обрабатываемую деформирующим инструментом поверхность одновременно воздействует давление инструмента и тепло, возникающее в результате прохождения тока между инструментом и деталью. Это вызывает упрочнение как за счет повышения физико-механических свойств поверхностного слоя, так и улучшения параметров микрорельефа самой поверхности.

Тепловыделение при ЭМО происходит вследствие

прохождения через деталь электрического тока и деформации металла в поверхностном слое. В результате такого комбинированного воздействия структура в поверхностном слое представляет собой измельченный мартенсит.

5) Правильный выбор вида обработки и шероховатости поверхности. Независимо от исходной шероховатости, которая может меняться в широких пределах, к концу приработки устанавливается для каждой пары трения своя определенная шероховатость, сохраняющаяся в течение длительного времени.

Если бы удалось обработать поверхность таким образом, чтобы исходная шероховатость соответствовала равновесной, то исчезла бы необходимость в периоде приработки деталей (см. кривую Лоренца). Однако добиться этого чрезвычайно сложно. Поэтому следует назначать такую финишную операцию, которая бы обеспечила окончательную шероховатость как можно ближе к равновесной. Чрезмерно чистые поверхности и чрезмерно грубые отрицательно влияют на износостойкость. Грубошероховатые поверхности контактируют по малым площадкам, что приводит к высоким фактическим давлениям и, следовательно, к большому износу. Гладкие поверхности склонны к заеданию, они хуже адсорбируют смазку.

Большое значение имеет направление следов обработки, которое не влияет на фрикционные свойства только при жидкостном трении, когда шероховатые поверхности разделены слоем смазки. При граничном трении мелкошероховатых поверхностей наименьший износ обеспечивается направлением следов обработки, перпендикулярным движению (устраняется схватывание), а при трении грубошероховатых поверхностей - параллельным движению.

Кроме шероховатости, на поверхности трения всегда имеется волнистость. Влияние волнистости на свойства поверхности неоднозначно. Волнистость приводит к изменению характера контакта. Вместо плоских поверхностей контактируют криволинейные. Поэтому несмазанные волнистые поверхности более склонны к схватыванию (адгезионному износу), чем плоские. В то же время волнистые поверхности лучше удерживают смазку во впадинах между волнами и

работают лучше плоских.

б) Наплавка износостойких слоев. Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей. Все известные виды наплавки имеют общие металлургические и физико-химические основы. К ним относятся: расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя детали, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка (ручная, полуавтоматическая), наплавка под слоем флюса и плазменно-дуговая. Наилучшие результаты получаются тогда, когда удается исключить контакт наплавленного металла с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей. Высокоэффективным методом наплавки является наплавка порошковой проволокой

7) Механическое упрочнение поверхностей - один из простых и наиболее экономичных способов упрочнения деталей машин. Здесь используется явление значительного роста предела текучести и, соответственно, твердости материала, при высокой степени пластической деформации. Этот метод часто называют деформационным упрочнением. Он основан на использовании в качестве деформирующих тел роликов, шариков, струи из мелких стальных или стеклянных шариков, а также сферических алмазных наконечников. Помимо упрочнения, поверхность деталей выглаживается, снижается их шероховатость. Вершины выступов становятся более пологими, и контакт переходит из пластического в упругое состояние. Все это существенно повышает усталостную износостойкость и прочность деталей, снижает срок их приработки.

Упрочнение дробью (шариками). Упрочнение дробью представляет собой процесс ППД за счет ударов дроби по обрабатываемой поверхности заготовок. Скорость дробинки может достигать (70...90) м/с.

Гидродробеструйное упрочнение производится шариками или дробью диаметром от 1 до 4 мм с давлением жидкости 0,2...0,8 МПа. В качестве СОЖ обычно используется трансформаторное масло или масло индустриальное. Время упрочнения в зависимости от размеров заготовки составляет 2...10 минут. Эффективность упрочнения определяется

режимами обработки и свойствами материала детали. При обработке титанового сплава ВТ3-1 давлением жидкости 0,2 МПа в течение двух минут обеспечивается повышение поверхностной твердости на 20...22 %, толщина наклепанного слоя 0,1...0,12 мм, формирование сжимающих остаточных напряжений с максимальным значением 450...500 МПа и шероховатость поверхности Ra 0,6...0,16 мкм. Предел выносливости плоских образцов после упрочнения увеличился с 400 до 480 МПа. Предел выносливости лопаток компрессора из сплава ВТ-8 в результате упрочнения дробью возрастает с 340 до 410 МПа.

Обкатывание роликами (шариками). Обкатывание производится на токарных или специальных станках. Обкатываемая заготовка в зависимости от ее конструкции и размеров устанавливается в центрах или патроне, а обкатное приспособление (обкатник) – в резцедержателе станка.

Изменение твердости (степень наклепа) и остаточные напряжения в поверхностном слое также зависят от режимов обработки. Большое значение при этом имеет давление в контакте между роликом и обрабатываемой поверхностью, зависящее от значения нормальной силы, размера диаметра и радиуса профиля ролика. С увеличением контактного давления твердость возрастает. У конструкционных сталей увеличение твердости может достигать 20...40 % и более.

Контрольные вопросы

1. Какие технологические методы применяют для повышения износостойкости деталей машин?
2. Какие виды термической обработки применяют при упрочнении поверхностей трения?
3. Какие виды химико-термической обработки получили широкое применение при упрочнении поверхностей трения?
4. Каковы достоинства хромирования?
5. В чем сущность электромеханической обработки деталей?
6. Какие методы наплавки износостойких покрытий получили наибольшее распространение?
7. В чем особенность методов поверхностного пластического деформирования?

14. Эксплуатационные методы повышения износостойкости

1) Очистка изделий перед эксплуатацией.

Для очистки деталей перед их сборкой от консервирующего смазочного материала или от загрязнений, оставшихся на поверхности при изготовлении, производят промывку деталей и обдувку их сжатым воздухом.

Особое внимание при очистке следует уделять каналам смазочной системы и маслопроводам, откуда осевшие на их стенки во время изготовления, хранения и транспортирования песок и другие загрязнения могут попасть в поток масла в процессе эксплуатации.

Все трубы, фитинги и клапаны перед поступлением на сборку необходимо тщательно очищать. Рекомендуется следующая технология очистки труб большого диаметра: дробеструйная очистка труб изнутри и продувка сжатым воздухом; погружение и выдержка в течение 1 ч в горячем масле с температурой на 15...20 °С выше наибольшей эксплуатационной температуры масла в системе; обстукивание трубы по длине; быстрый перенос в ванну с холодным маслом. После двукратного повторения процедуры и выемки трубы из последней ванны дают маслу стечь и через трубу протягивают тампон из неворсистой ткани. После проверки чистоты внутренней полости открытые отверстия трубы закрывают.

Промытые от консервирующего смазочного материала прецизионные детали и комплекты, подготовленные к сборке, но не идущие сразу на комплектование, помещают в закрытые ящики с рабочей жидкостью для предохранения от попадания пыли и других посторонних частиц на поверхности деталей и в их внутренние полости.

Наиболее ответственные агрегаты следует собирать в закрытых помещениях, вдали от дорог, дымовых труб и других источников пыли.

Предусматриваются также меры по созданию избыточного давления в помещениях.

Собранные агрегаты и отдельные узлы машин при

изготовлении или ремонте промываются – прокачиваются на специальных установках или стендах теми жидкостями, на которых они работают. Давление и температура промывочных жидкостей должны соответствовать рабочим давлениям и температурам. Для контроля качества промывки устанавливают контрольные фильтры. При обнаружении на фильтрах металлических блесток или других механических частиц фильтры очищаются и агрегат промывается вновь. После промывки-прокачки наружную поверхность агрегатов промывают от рабочей жидкости, а наружные отверстия закупоривают.

В сложных машинах промывку систем производят по частям. При этом отдельные участки системы закольцовывают специальным промывочным агрегатом. Параллельно работающие в системе трубопроводы не рекомендуется промывать одновременно, так как может быть не обеспечено одинаковое качество их промывки. Одновременная промывка трубопроводов и баков не рекомендуется, так как механические частицы, вымытые из трубопроводов, могут задерживаться между перегородками бака. Скорость движения жидкости при промывке обычно принимают в 1,5...2 раза больше рабочих скоростей.

Гидравлические системы после слива рабочей жидкости наполняют растворителем, включают насос и переставляют золотники или краны так, чтобы облегчить промывку устройств и гидроприводов. Циркуляционную смазочную систему автотракторных двигателей рекомендуется промывать так: снять масляные фильтры, поставить их колпаки и, используя специальные наконечники, промыть систему с помощью нагнетателя сначала в направлении масляного насоса, а затем – в направлении подшипников коленчатого вала, поворачивая последний вручную на половину оборота; затем с помощью нагнетателя вытесняют остатки дизельного топлива и заполняют систему чистым маслом.

Одновременно с промывкой и заливкой картеров производят промывку всех точек ручного смазывания. Должны быть также тщательно очищены детали, связанные с вентиляцией в системе. Обычно при смене масла заменяют фильтрующие элементы фильтра тонкой очистки.

Перед вводом в эксплуатацию машины, находящейся на длительном хранении, необходимо тщательно удалить с нее консервирующую смазку. Двигатели внутреннего сгорания прогревают для этого горячей водой до температуры блока цилиндров 60...70 °С. После удаления консервирующей смазки с деталей и спуска ее из картеров промывают систему. Соблюдение этих условий необходимо, ибо остатки тугоплавкой консервирующей смазки могут уже в первые часы работы машины закупорить масляные каналы и прекратить доступ масла к смазываемым точкам.

2) Обкатка машин.

Любая новая или капитально отремонтированная машина подлежит обкатке. Назначение обкатки - приработать в едином комплекте все пары трения, создать в них равновесную шероховатость. Пока не сформировалась приработанная шероховатость, мала фактическая площадь касания деталей. Приложение эксплуатационных нагрузок к таким деталям приводит к значительному износу.

Приработка проходит сравнительно быстро. У автомобильных двигателей на это требуется 1...2 ч, между тем полная приработка двигателя длится 35...40 ч, а полная обкатка тракторных двигателей по некоторым режимам 50...60 ч.

Приработка протекает на отдельных участках в режимах трения при граничной и полужидкостной смазке. При этом происходит повышенное накопление продуктов изнашивания, поэтому при стендовой обкатке машин необходимо использовать специальную циркуляционную смазочную систему с усиленной фильтрацией для предохранения поверхностей трения от повреждений продуктами изнашивания.

После приработки масло в картерах и остальных элементах системы загрязняется и его следует считать отработанным. Слив масла для лучшего удаления отстоя и загрязнений производят, когда масло достаточно прогрето. Картер промывают маловязким маслом или смесью масла и керосина. Масляные фильтры и отстойники промывают керосином или другой промывочной жидкостью. Промывка трущихся поверхностей керосином после обкатки недопустима: керосин смывает

масляную пленку и после пуска машины поверхности будут кратковременно работать без смазки.

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.

Обкатку машины начинают с холостого хода на малых скоростях. Холостой ход используют также для проверки исправности всех устройств и систем. Если при эксплуатации машины некоторые узлы трения работают при повышенных температурах, то при обкатке должен быть этап, соответствующий такому тепловому режиму машины. Обкатка, например, автотракторных двигателей складывается из холодной (с приводом от постороннего источника) и горячей. Режим горячей обкатки под нагрузкой иногда относят к испытаниям. Различные варианты режимов обкатки связаны с разной их продолжительностью и дают неодинаковую величину первичного (прирабочного) износа. Оптимальный вариант режима обкатки машины должен удовлетворять требованиям наименьшего первичного износа трущихся частей, минимальных затрат времени и средств.

Свойства смазочного материала при обкатке, как и при любом режиме трения смазанных поверхностей, имеют существенное значение. Маловязкие масла, проникая через узкие щели, лучше, чем пластичные смазки, отводят теплоту от поверхностей трения, лучше смывают с рабочих поверхностей образовавшиеся продукты изнашивания; фильтрация таких масел и выделение из них загрязнений облегчены. Распространены рекомендации о применении во время обкатки смазочных масел в 2...3 раза меньшей вязкости, чем масла, применяемого в эксплуатации для данной машины. Режимы обкатки при этом подбирают такими, чтобы было исключено заедание узлов трения. При обкатке автотракторных двигателей применяли веретенные масла.

Для сокращения времени обкатки применяют присадки к

маслам, позволяющие форсировать режим. Присадками к маслам при обкатке могут служить поверхностно-активные вещества, их металлические мыла, органические соединения серы, хлора, фосфора и других компонентов; металлоплакирующие.

В основе действия поверхностно-активных веществ лежит их способность адсорбироваться на поверхностях раздела фаз. При невысоких давлениях в контакте смазочный материал, образуя прочный адсорбированный слой, разделяет поверхности трения и уменьшает износ.

Действие присадок, содержащих серу, хлор и фосфор, основано на образовании легко срабатываемых пленок, которые получаются в результате химического взаимодействия активного элемента с металлом детали. Серосодержащие масла образуют различного состава сульфиды железа, меди, алюминия, олова, сурьмы, магния и ускоряют образование окислов железа. На меди и сплавах на ее основе образуется сплошная сульфидная пленка относительно большой толщины. Сера, проникая в межкристаллитные границы и микротрещины поверхностных слоев стальных и чугунных деталей, действует как поверхностно-активное вещество.

3) Стендовые и эксплуатационные испытания.

Стендовые испытания включают в себя два вида испытаний. Первый вид испытаний машины или агрегата является одним из этапов технологического процесса, следующим за окончанием сборочных работ; задача его состоит в проверке правильности сборки и работы машины или агрегата. Собранная машина должна быть проверена на рабочей частоте вращения, так как вследствие упругих и температурных деформаций, суммирования погрешностей в пределах допусков в сложной размерной цепи узлов и механизмов возможны нарушения посадок с зазорами и взаимного расположения деталей, а также другие дефекты.

Второй вид стендовых испытаний носит исследовательский характер и проводится в лабораторных или близких к ним условиях. Эти испытания позволяют изучить технические характеристики машины, проверить правильность выбора расчетных схем, конструктивных размеров и параметров узлов, установить гарантийный срок службы, выявить наиболее неблагоприятные с

точки зрения прочности, износостойкости, жесткости и других признаков узлы и детали для разработки соответствующих конструктивных и технологических мероприятий.

Стендовые испытания могут быть проведены на элементах узла, на узле, взятом отдельно от агрегата, и на агрегате в сборе. Так, при испытаниях ведущих мостов автомобилей испытывают отдельно картеры, полуоси, шестерни, подшипники и мосты в сборе.

Преимущества стендовых испытаний состоят в том, что они позволяют изучить влияние отдельных факторов на работу узлов и агрегатов; позволяют создать стабильные режимы нагружения, близко воспроизводящие те или иные эксплуатационные условия, применить увеличенные или учащенные нагрузки по сравнению с эксплуатационными для ускорения испытаний, реализовать специальные режимы нагружения для сравнительной оценки различных конструкций. При сроке службы машины, исчисляемом многими тысячами рабочих часов, стендовые испытания являются во многих случаях единственной возможностью своевременной экспериментальной проверки конструкции.

Испытания на долговечность включают в стендовые испытания и выявляют время работы деталей до предельного износа или до разрушения под действием статической, переменной или динамической нагрузок.

При испытаниях необходимо выявить износ деталей. Методы определения износа: взвешивание и измерение размеров деталей до и после работы; профилографирование поверхностей; нанесение на детали углублений (лунок), отпечатков алмазных пирамид и замер их или их слепков до и после работы; определение количества продуктов износа в масле спектральным методом или методом меченых атомов.

После выяснения причин повышенного или недопустимого по интенсивности изнашивания деталей можно в зависимости от обстоятельств рекомендовать: улучшить прирабатываемость трущихся деталей применением противозадирных средств; увеличить износостойкость деталей повышением твердости материала поверхностных слоев или нанесением специальных покрытий; изменить условия работы детали (уменьшить вибрацию

или температуру); произвести замену материала деталей сочленения; увеличить жесткость конструкции узла, или, наоборот, уменьшить ее; улучшить условия смазывания; разработать меры по защите трущегося сочленения от попадания пыли.

4) Выбор режимов эксплуатации.

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. В связи с этим на прецизионных металлорежущих станках нельзя производить обдирочные работы; припуск на отделочные операции должен быть минимальным в соответствии с нормативами.

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.

Для уменьшения износа полезно перед пуском двигателя повернуть коленчатый вал несколько раз вручную или с помощью стартера. Перед пуском, например, судовых дизелей производят прокачку двигателя маслом, сочетая эту операцию с проворачиванием коленчатого вала на 2...3 оборота валоповоротным устройством.

Переход на более форсированный режим работы машины может значительно ухудшить условия работы трущихся деталей. При эксплуатации дизелей замечено, что вслед за увеличением частоты вращения коленчатого вала давление подачи масла в подшипники заметно снижается и только через некоторое время начинает медленно повышаться до величины, соответствующей скоростному режиму работы машины. Аналогичные явления наблюдаются в случае «разноса» двигателя.

Длительные установившиеся режимы работы машины при нагрузках ниже номинальных в некоторых случаях повышают скорость изнашивания. Это относится в первую очередь к двигателям внутреннего сгорания, где при подобных условиях

тепловой режим неблагоприятен для работы цилиндропоршневой группы, а скоростной режим – для смазывания поверхностей трения.

5) Смазывание узлов при эксплуатации.

Масло в системе вследствие старения теряет смазочные свойства и требуется, несмотря на действие очистительных устройств, периодическая замена его на свежее. Независимо от регламентированных сроков масло меняют в случаях выпадения шлама более обычного и выхода значений кислотного числа, вязкости и других показателей за пределы установленных норм. В системах большой вместимости рекомендуется периодически производить анализ работающего масла.

У пластичного смазочного материала засоряется только рабочий слой, т.е. слой, покрывающий поверхности трения. Сильное загрязнение этого слоя усиливает изнашивание деталей и затрудняет смену смазочного материала.

Смазывание машин должно производиться в соответствии с заводскими инструкциями. Сроки смены масла зависят от условий работы машины и могут быть различными для одной и той же машины. Так, при работе автомобиля в тяжелых дорожных условиях, когда приходится часто форсировать двигатель и пользоваться промежуточными передачами, добавку и смену смазочных материалов следует производить чаще.

Помимо общей инструкции по смазыванию машины составляют для наглядности и во избежание пропусков смазочных точек карту смазывания, где должны быть указаны все смазываемые точки; при необходимости приводят схемы узлов.

Контрольные вопросы

1. Какие эксплуатационные методы применяют для повышения износостойкости деталей машин?
2. Каков порядок обкатки двигателей внутреннего сгорания?
3. Каково назначение стендовых и эксплуатационных испытаний?
4. Как режимы эксплуатации узлов и агрегатов машин влияют на их ресурс?
5. Что понимают под картой смазки?

2 ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

1. Определение износа материалов при триботехнических испытаниях

Цель работы: ознакомиться с оборудованием для триботехнических испытаний, получить значения момента трения (коэффициента трения), определить интенсивность изнашивания и температуру в контакте трущихся тел.

Задание: ознакомиться с общими сведениями по работе; изучить устройство и принцип работы машины для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1; провести испытание образца на износ; обработать данные по результатам испытания; оформить отчет о проведенной работе.

Оборудование и материалы: машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1; образцы (ролик (сталь45), колодка (сталь 45)); весы аналитические WA-31, термомпара; мультиметр; индикатор часового типа; секундомер.

Общие сведения

В триботехнике используются различные методики испытаний материалов и узлов трения, которые регламентированы отечественными и зарубежными стандартами: ГОСТ, ASTM, SAE, ISO и DIN, классифицированных по объектам испытаний, видам и условиям нагружений, назначению и целям испытаний. Также для решения специальных задач при научных исследованиях разрабатываются специальные нестандартизированные методики.

В дальнейшем для выполнения лабораторных работ нами будут использоваться стандартизированные методики испытаний по ГОСТ 30480-97, ГОСТ 23.224-86 и др., а также методики разработанные преподавателями ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина».

Основным методом прогнозирования качества трибосопряжений является трибомониторинг. Он охватывает совокупность средств методов испытаний и диагностики, непрерывного контроля и регулирования характеристик

подвижных сопряжений. В трибомониторинге выделяют два направления: трибometriю и трибодиагностику.

Трибoметрия – это система методов и средств измерения основных параметров фрикционного контакта (силы трения, износ, температура, шероховатость, контактная деформация, контурная и фактическая площади контакта) как в процессе трения, так и после фрикционного взаимодействия.

Трибoметрические измерения делятся на два вида: *лабораторные*, при которых производится оценка сил трения и износостойкости материалов в определенных условиях; *натурные*, при которых оценивают узлы трения реальных машин.

Трибодиагностика – это совокупность методов и средств непрерывного контроля состояния поверхностей контактирующих деталей по продуктам изнашивания в смазке.

Трибомониторинг является основной частью триботехнических испытаний. Цель этих испытаний – установить совместимость выбранных материалов в паре трения, включая смазочный материал и привести их фрикционно-износные характеристики, которые сопоставляются с классами износостойкости (см. приложение 2), с базами данных по коэффициентам трения материалов и с техническими требованиями, предъявляемых к конкретным узлам трения для заданных условий эксплуатации, с целью подбора оптимальных материалов, для которых и выполняются испытания.

В зависимости от назначения, применяемые в триботехнике средства испытаний можно условно разделить на три большие группы:

– приборы для определения геометрических, физико-механических и теплофизических свойств поверхностей контактирующих элементов пары трения (например, твердомеры, профилометры, дилатометры, оптические и сканирующие зондовые микроскопы, износомеры базовырезающие, термопары, дефектоскопы и т. п.);

– лабораторные машины и установки для испытаний материалов на трение и износ (машины трения, установки, имитирующие соответствующие типы сопряжений);

– стенды для испытания узлов трения.

Машины трения и стенды, как правило, имеют блочный принцип построения и включают ряд функциональных блоков.

1. Испытательный блок, который предназначен для формирования испытываемой пары трения. Он должен обеспечивать точную, надежную и достаточно быструю установку образцов, однозначность и определенность в реализации расчетной схемы испытаний, включая равномерность нагрузки и износа образцов за счет их самоустанавливаемости или других мер. Соединения испытательного блока не должны иметь зазоров, вызывающих дополнительные динамические нагрузки на элементы конструкции. Чаще всего должна обеспечиваться возможность испытаний образцов различных типов по нескольким схемам, т. е. универсальность и возможность быстрой переналадки. Испытательный блок обычно связан с блоком привода, с измерительным блоком и с нагружающим блоком.

2. Блок привода предназначен для сообщения движения одному или нескольким элементам (или образцам), которые входят в узел трения. Он обычно включает электродвигатель (иногда гидродвигатель), передаточный механизм, кинематика которого определяется фактором относительного движения пары трения. Привод должен обеспечивать плавность движения, без рывков и ударов, широкий диапазон регулирования скорости движения или частоты вращения, устойчивое поддержание заданной программой испытания скорости движения или частоты вращения образца.

3. Блок нагружения предназначен для создания заданной нагрузки на образцы, постоянной или переменной, и поддержания этой нагрузки на заданном уровне. Для этого используют рычажно-гравитационные, пружинные, пневматические, электромагнитные и гидравлические механизмы, которые должны обеспечивать плавное приложение и стабильность режима нагружения независимо от изменений в процессах трения и изнашивания.

4. Блок накопления кинетической энергии (на машинах нестационарного трения), который выполняется в виде набора маховых масс, присоединяемых по мере необходимости к валу машины, на котором закреплен один из испытуемых образцов.

5. Блок для имитации специальной среды (газовой, жидкостной) при испытаниях пары трения. Камера этого блока служит для проведения испытаний в условиях повышенных или пониженных температур, вакуума, загрязнения абразивом, смазочного материала и т. п. Часто она выполняет также защитную функцию, ограждая оператора от воздействия продуктов износа, шума и др.

6. Блоки управления и измерения. Они обычно электрически связаны с машиной и приборами контроля (компьютером) для обработки информации, регистрируемой в процессе испытания: момента (силы) трения, силы нормального давления, скорости, пути трения, температуры в заданной зоне, работы трения, износа.

В России ООО «Точприбор Северо-Запад» (г. Санкт-Петербург) в настоящее время выпускает серийно разработанные совместно с ИМАШ РАН триботехнические комплексы 2168 УМТ, ИИ-5018, 2070 СМТ-1 (рис. 13). Концерн «Наноиндустрия» предлагает универсальную машину трения МТУ – 01 (рис. 14). Перечисленные выше широко распространенные модели машин трения, имеют ряд сменных узлов, которые позволяют проводить испытания практически по всем схемам контактирования фрикционных элементов в парах трения, применяемых в машиностроении. Схемы испытаний, осуществляемых на машине трения СМТ-1, представлены в табл. 3. Машина трения МТУ-01 позволяет осуществлять исследования по следующей схеме: контакт торца вращающегося ролика с плоскостью неподвижного образца, что позволяет смоделировать процесс трения и определить характеристики при контакте плоских деталей.



Рисунок 13 – Общий вид машины трения 2070 СМТ-1



Рисунок 14 – Общий вид машины трения МТУ – 01

Порядок выполнения работы

1. Изучить методику проведения испытаний на машине СМТ-1 (Приложение 1, паспорт на машину трения СМТ-1).

2. Выполнить (с помощью преподавателя или лаборанта) следующие операции до установки образцов:

- выбрать схему испытаний «образец-контртело» по таблице 3;
- определить диапазон частоты вращения образцов (контртела), n ;
- установить необходимый шпиндель;
- подключить воду для охлаждения;
- установить требуемый коэффициент проскальзывания сменной шкива.

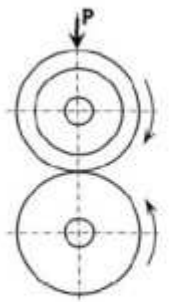
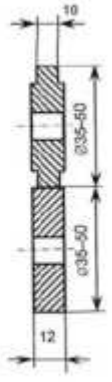
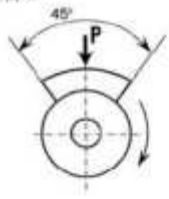
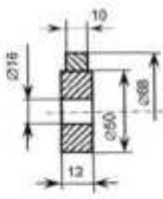
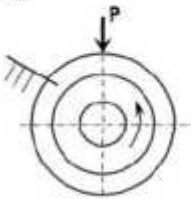
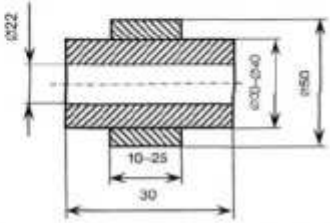
3. Выбрать образец согласно размерам, указанным в таблице 3, протереть поверхность трения тампоном, смоченным в растворителе, определить его массу m_1 на аналитических весах.

Установить образец в держателе. Проверить индикатором биение образцов и их поворотом добиться наименьшего биения.

4. Выключателем подать напряжение на вход электрической схемы машины. Тумблерами, находящимися на передней панели, включить потенциометры, записывающие температуру в зоне трения и момент трения.

5. Установить переключатель рода работы (Приложение 1) в положение «Проверка» и осуществить тарировку системы измерения момента трения. Для этого застопорить фиксатором диск датчика момента трения, на вал машины установить рычаг, уравновесить его и закрепить гайкой. Кнопкой установить диапазон измерения момента трения в положение «I». Резисторами, расположенными на панели потенциометра, установить положение «Нуль». На подвес рычага установить груз массой 5 кг ($M_{тр} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и резистором «Установка предела» довести стрелку прибора до деления «100». Снять груз и проконтролировать положение нуля. Последовательно увеличивая нагрузку путем установки на подвес грузов массой 0,25; 0,25; 0,5; 0,5 и 0,5 кг, записать показания прибора. Соответствующие моменты трения будут равны 1; 2; 4; 6; 8 и 10 Н·м. Тарировку провести три раза на диапазонах «I» и «II». Снять фиксатор диска (см. паспорт машины трения 2070 СМТ-1).

Таблица 3 - Варианты схем испытаний «образец-контртело», осуществляемых на машине трения 2070 СМТ-1

Схемы испытаний	Размеры образцов
<p data-bbox="218 295 330 319">Диск-диск</p> 	
<p data-bbox="218 718 364 742">Диск-колодка</p> 	
<p data-bbox="218 981 341 1005">Вал-втулка</p> 	

6. Установить переключатель рода работы (Приложение 1) в положение «Работа» и кнопкой запустить в работу электродвигатель (должна загореться сигнальная лампочка). В

зависимости от выбранных режимов нагружения установить диапазоны измерения частоты вращения вала кнопкой (в положение «5» или «10») и кнопкой – «Момент трения» (на «1» или «2»); стрелку потенциометра 5 установить в положение «Нуль»; установить требуемую скорость вращения вала резисторами (грубо) и (точно), сверяясь с показаниями предварительно протарированного механическим тахометром вольтметра.

7. Установить термопару в отверстие образца (рис. 15). В учебных целях, с целью сокращения времени на подготовку к испытаниям, термопару к колодке крепить винтом в предварительно изготовленное резьбовое отверстие, находящееся в зоне температурного контроля.



Рисунок 15 – Общий вид испытательной камеры с установленными образцами и термопарой

8. Каретку до соприкосновения образцов опускать плавно, не допуская ударов.

9. Требуемую нагрузку задавать пружиной либо навесными грузами. Нагружение образцов вести плавно, вращая винт нагружения при вращении образцов, наблюдая за величиной момента трения по потенциометру.

10. Скорректировать частоту вращения вала резисторами.

11. Испытание образца на износ провести в течение времени $t = 30$ мин.

12. После окончания испытаний выключить машину (последовательность операций — обратная вышеописанной).

13. Провести оценку среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения момента трения и построить тарировочный график (см. рис. 16) $M_{тр} = M(n')$, где n' — показания по шкале потенциометра.

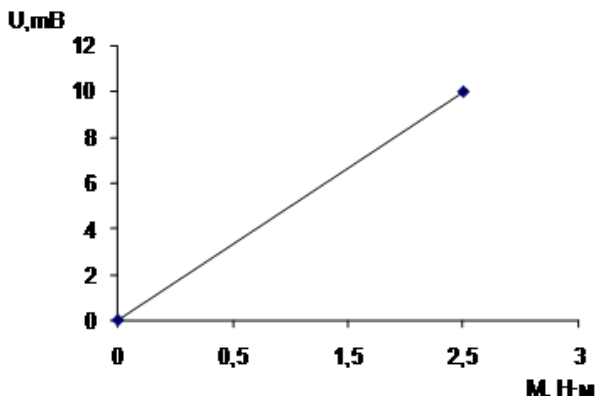


Рисунок 15 – Тарировочный график датчика момента трения

14. Рассчитать коэффициент трения по формуле:

$$f_{TP} = \frac{2M_{TP}}{d \cdot N},$$

где d – диаметр образца – ролика, м; N – нормальная нагрузка, Н.

14. Определить массу образца после истирания (m_2) взвешиванием на аналитических весах WA-31 (рис. 16):

- образец промыть в бензине;
- высушиваем образец в сушильном шкафу в течении 30 минут при температуре 353 К°.
- проводим взвешивание образца, путем уравновешивания чашек весов с образцом и подбираемым грузиком установленной массы.



Рисунок 16 – Общий вид весов WA-31

Рассчитать интенсивность изнашивания по формуле:

$$I = (m_1 - m_2) / (L),$$

где L – длина пути скольжения ($L = \pi d n t$).

15. Сравнить полученное значение интенсивности изнашивания с данными таблицы приложения 1 и определить класс износостойкости исследованного образца.

16. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытания.

Примечание: Показания момента трения и температуры снимать через каждую минуту и заносить в сводную таблицу. При резком повышении момента трения или температуры, что является признаками начала периода катастрофического износа, прекратить испытание.

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.
2. Зарисовать схему испытаний.
3. Выполнить эскиз образцов.
4. Заполнить сводную таблицу результатов испытания.

Таблица 4 — Влияние времени испытания на момент трения и температуру в зоне трения

Время испытания, мин	Момент трения, Н·м	Температура, °С
1		

5. Построить тарировочный график $M_{тр} = M(n')$.
6. Произвести расчет интенсивности изнашивания.
7. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытаний.
8. Сделать заключение.

Контрольные вопросы

1. Какие методы измерения коэффициента трения и износа наиболее часто применяются в триботехнике?
2. Какие машины трения широко распространены в настоящее время?
3. Чем отличаются лабораторные испытания от стендовых и эксплуатационных?
4. Назовите схемы контактирования элементов пары трения и реальные узлы машин, в которых они могут быть реализованы.

2. Изучение микрогеометрии поверхности

Цель работы: изучить методики определения параметров шероховатости; ознакомиться с оборудованием, применяемым при определении параметров шероховатости поверхности; установить характер влияния вида механической обработки поверхности на параметры шероховатости.

Задание: ознакомиться с содержанием работы; изучить устройство, принцип работы профилометра модели 130; подготовить к работе профилометр; снять профилограмму поверхностей образцов; рассчитать параметры шероховатости поверхностей; составить отчет о проделанной работе.

Оборудование и материалы: измерительный инструмент для определения длины линий; профилометр модели 130; образцы материалов, обработанных различными методами (шлифованием, точением, фрезерованием, полированием и т.д.).

Общие сведения

В процессе изготовления или при эксплуатации деталей машин на их поверхности формируются неровности, которые определяют топографию поверхности. Принято различать четыре вида отклонений от правильной геометрической формы поверхности: макроотклонения, волнистость, шероховатость и субмикрощероховатость. К макроотклонениям относятся единичные, неповторяющиеся отклонения формы от номинальной идеализированно правильной геометрии (выпуклость, вогнутость, конусность) в соответствии с ГОСТ 2789–73:

1. Волнистость представляет собой совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние между которыми значительно больше, чем у неровностей, образующих шероховатость поверхности. Расстояние между вершинами волн (шаг волн) находится в пределах 0,8...10 мм, а высота, как правило, – в пределах 0,03...500 мкм. Форма волн близка к синусоидальной.

2. Под шероховатостью поверхности понимают совокупность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности. Шаг микронеровностей

меняется в пределах 2...800 мкм, а их высота – от 0,01 до 400 мкм. На выступах, образующих шероховатость, имеются еще более мелкие неровности – субмикрошероховатости. С помощью электронно-микроскопических исследований установлено, что субмикрошероховатость образуется неровностями, имеющими высоту 2...20 нм.

Пример профилограммы участка поверхности, по которой определяют параметры микрошероховатости деталей машин, представлена на рисунке 17.

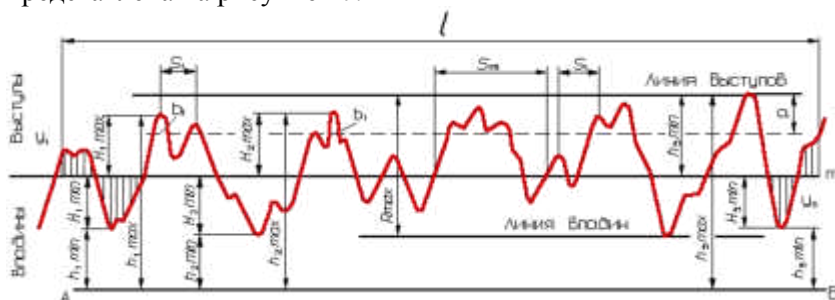


Рисунок 17 – Профилограмма

Существуют несколько методов измерения параметров шероховатости. К ним можно отнести:

- оптические (методы светового сечения; теневого сечения; микроинтерференционные; с применением растров);
- щуповой (контактный) – при щуповом методе измерения в качестве щупа используют остро заточенную иглу, поступательно перемещающуюся по определенной трассе относительно поверхности. Ось иглы располагают по нормали к поверхности образца. Опускаясь во впадины, а затем, поднимаясь на выступы во время движения ошупывающей головки по испытуемой поверхности, игла колеблется относительно головки соответственно огибаемому профилю.

Механические колебания иглы преобразуются в электрические с помощью электромеханического преобразователя. Снятый с преобразователя сигнал усиливают, а затем измеряют его параметры, характеризующие неровности исследуемой поверхности (профилометрирование), или

записывают параметры профиля поверхности в заранее выбранных вертикальном и горизонтальном масштабах (профилографирование). Щуповые приборы, предназначенные для измерений параметров шероховатости поверхности, называют профилометрами, а такие же приборы для записи неровностей поверхности – профилографами. Профилографы позволяют также измерять параметры шероховатости.

По выше описанному методу работает профилометр модели 130 производства ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ» (рис. 18).

Основными составными частями профилометра модели 130 являются: привод с кабелем; датчик; стойка в виде плиты и колонны с кареткой и стопорным кольцом; призма; калибровочная мера и информационно-вычислительный блок (ИВБ) в виде компьютерной ISA-платы, встраиваемой в компьютер с разъёмом ISA и системой Windows-98, или в виде выносного блока с ISA-платой, подключаемого кабелем к компьютерной PCI-плате, встраиваемой в компьютер с разъёмом PCI и системой Windows-XP и выше. Управляющий компьютер из процессорного блока, дисплея, клавиатуры, мыши и принтера в базовую комплектацию профилометра не входит и поставляется в составе профилометра по дополнительному заказу его состава.



Рисунок 18 – Внешний вид профилометра модели 130 с управляющим компьютером

Действие профилометра основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом индуктивного датчика – алмазной иглой в процессе трассирования (перемещения датчика вдоль измеряемой поверхности с постоянной скоростью), преобразования перемещения щупа в аналоговый цифровой сигнал с дальнейшей обработкой сигнала в компьютере. Схематическая конструкция профилометра модели 130 показана на рис. 19.

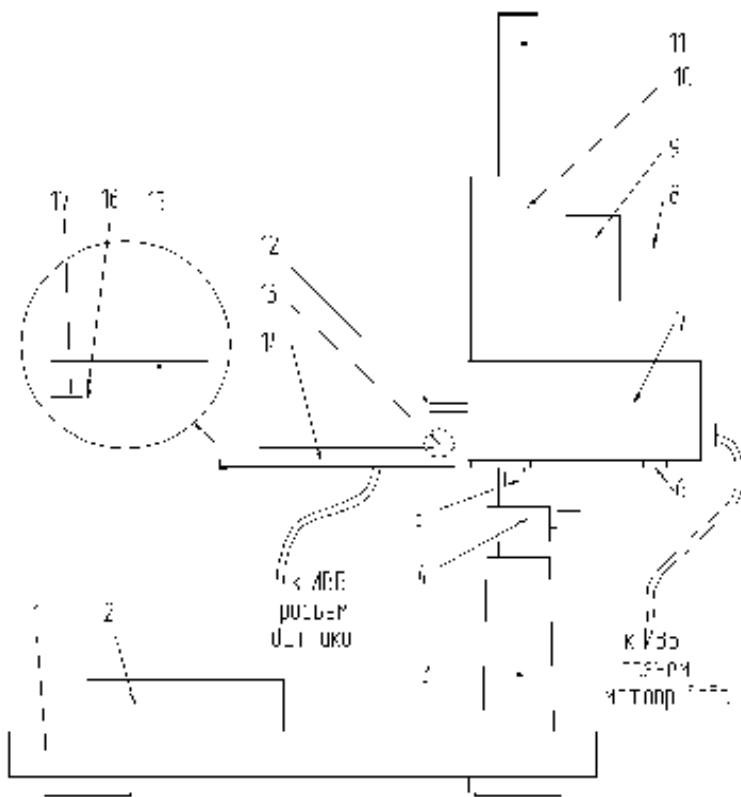


Рисунок 19 – Схематическая конструкция профилометра модели 130

Измеряемая деталь устанавливается на плиту 1 стойки или, если это необходимо, на призму 2, которую можно двигать по плите вдоль направления трассирования, а также класть набор для укладки плоских деталей. Датчик 14 закрепляется своим хвостовиком диаметром 10 мм в гнезде движущегося при трассировании штока привода 12 и фиксируется винтом 13. Привод 7, предназначенный для осуществления трассирования, крепится на каретке 10 стойки винтом крепления привода 5. Каретка имеет сзади стопорный винт, при ослаблении которого каретка может свободно перемещаться по колонне 11 стойки вверх-вниз с поворотом вокруг оси колонны. При этом для страховки от удара датчика о деталь при перемещении каретки вниз необходимо использовать стопорное кольцо 4. После фиксации каретки на какой-то ориентировочной высоте каретка может плавно перемещаться в вертикальном направлении по колонне стойке с помощью рукояток 8 с обеих сторон каретки с фиксатором 9 перемещения каретки, который наряду с усилителем 3 колонны стойки служит для уменьшения вибраций датчика относительно детали в процессе трассирования.

На плите могут измеряться детали высотой до 220 мм. Если повернуть привод с датчиком на 180 градусов, то под датчик можно устанавливать любые большие детали, например, железнодорожное колесо. Измерения можно проводить и без стойки, сняв с неё привод с датчиком, и положив датчик на его ножки 6 на плоскость измеряемой детали. Привод с датчиком можно также просто положить на стол, подкладывая под датчик измеряемые детали и подкладывая под привод пластины толщиной, примерно равной высоте измеряемой детали (плюс 1 мм или минус 0.2 мм относительно высоты измеряемой детали).

Из передней части корпуса 14 датчика выступает носик датчика 15 из нержавеющей стали, на конце которого снизу укреплена твердосплавная опора 17, и за ней на расстоянии около 0.5 мм выступает алмазная игла датчика 16.

При измерениях опора датчика скользит по измеряемой поверхности, описывая огибающую поверхности по

вершинам профиля, а игла, также скользя по измеряемой поверхности, снимает собственно профиль поверхности за вычетом её огибающей.

В сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ) исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью специальных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1 – 10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом; различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитно-силового и электросилового микроскопов.

Для получения СЗМ изображения осуществляют специальным образом организованный процесс сканирования образца. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ изображение рельефа поверхности $Z = f(x,y)$ строится с помощью средств компьютерной графики. Схема, поясняющая принцип работы СЗМ представлена на рисунке 20. Наряду с исследованием рельефа поверхности, зондовые микроскопы позволяют изучать различные свойства поверхности: механические, электрические, магнитные, оптические и многие другие.

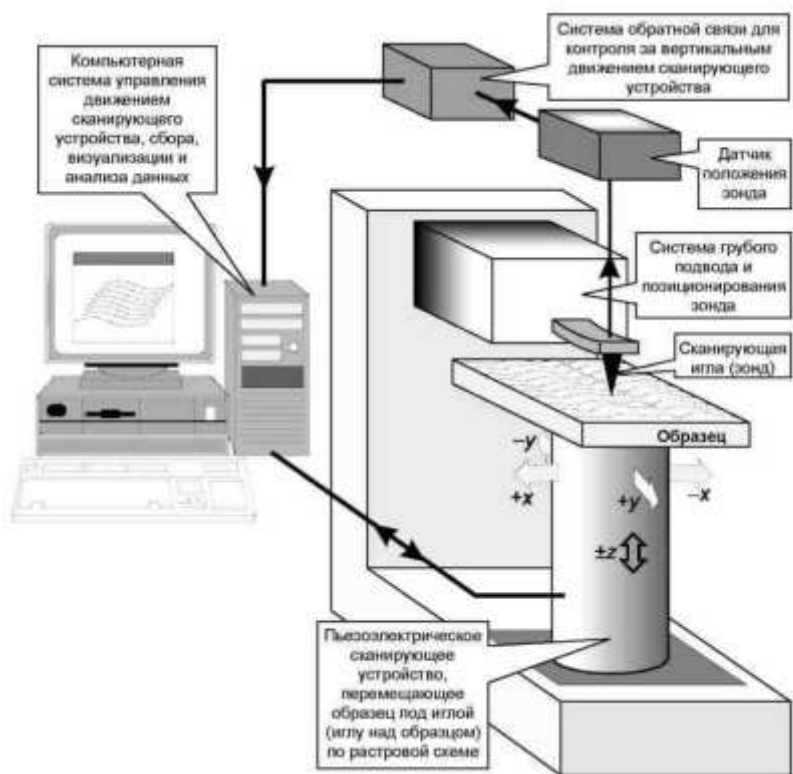


Рисунок 20 – Общая схема работы сканирующего зондового микроскопа

Визуализация СЗМ кадров производится средствами компьютерной графики, в основном, в виде трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображений. При 3D визуализации изображение поверхности $Z = f(x,y)$, соответствующей СЗМ данным, строится в аксонометрической перспективе с помощью пикселей или линий. В дополнение к этому используются различные способы подсвечивания пикселей, соответствующих

различной высоте рельефа поверхности. Наиболее эффективным способом раскраски 3D изображений является моделирование условий подсветки поверхности точечным источником, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью (рис. 21). При этом удается подчеркнуть мелкомасштабные неровности рельефа. Также средствами компьютерной обработки и графики реализуются масштабирование и вращение 3D СЗМ изображений. При 2D визуализации каждой точке поверхности $Z = f(x,y)$ ставится в соответствие цвет. Наиболее широко используются градиентные палитры, в которых раскраска изображения производится тоном определенного цвета в соответствии с высотой точки поверхности. На рис. 22 для примера приведено 2D изображение участка поверхности.

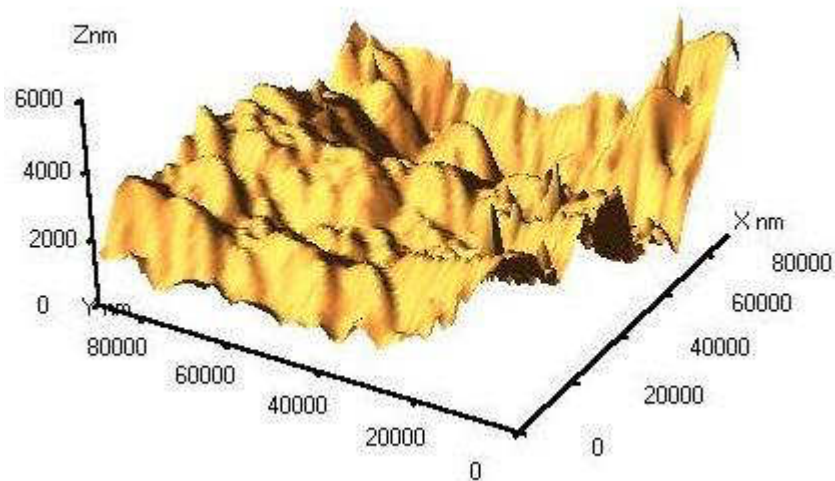


Рисунок 21 – 3D визуализация рельефа поверхности

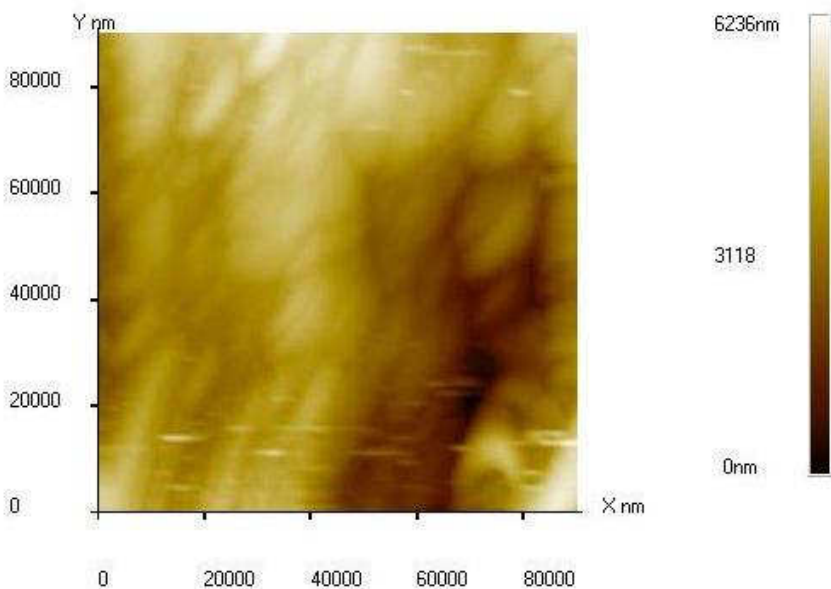


Рисунок 22 – Яркостное 2D изображение поверхности

Порядок выполнения работы.

1. Изучить инструкцию и методику получения профилограмм с помощью профилографа модели 130.
2. Получить профилограммы образцов (по указанию преподавателя).
3. Рассчитать геометрические параметры поверхности. При этом руководствоваться следующей методикой:
 - выбрать характерный участок профилограммы, содержащий не менее пяти микровыступов и пяти микровпадин;
 - провести среднюю линию профиля;
 - на средней линии нанести отрезки (не менее 20) и определить для них отклонения от профиля u_i ;
 - рассчитать среднее арифметическое отклонение профиля по формуле:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|,$$

где n – число выбранных точек профиля на базовой длине;

y – отклонение профиля между любой точкой профиля и средней линией.

– определить значения высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин;

– вычислить высоту неровностей профиля Rz по десяти точкам, как $1/5$ суммы средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин, измеренных по отношению к средней линии профиля на базовой длине:

$$Rz = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right],$$

где y_{pi} - высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{vi} - глубина i -й наибольшей впадины профиля.

– определить максимальную высоту микронеровностей R_{max} – расстояние между линией впадин и линией выступов, которые проводятся параллельно средней линии профиля соответственно через самую глубокую впадину и вершину самого высокого выступа $R_{max} = y_{p, max} + y_{v, max}$;

– определить шаг микронеровностей S_m – среднее расстояние между двумя соседними точками пересечения со средней линией профиля участков, имеющих с ней одинаковый по знаку наклон (расчет проводить для $n = 5$):

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi},$$

где n – число пересечений; S_{mi} – шаг профиля на i -м участке;

– вычислить среднее расстояние между выступами:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

где S_i – расстояние между соседними выступами на базовой длине профилограммы l ;

4. Для выбранной профилограммы построить опорную кривую профиля поверхности $tp(\epsilon)$, т. е. зависимость опорной длины профиля от уровня сечения профиля. Для этого следует:

– параллельно средней линии профиля провести не менее 10 сечений;

– для каждого сечения определить ϵ как отношение расстояния этого сечения от линии начала отсчета к R_{\max} и tp как относительную сумму длин сечений микронеровностей по формуле:

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где l_i – длина сечения i -го выступа.

5. Определить значения параметров b и v начального участка функции $t_p = b\epsilon^v$. Для этого на кривой выбрать две характерные точки в интервале $0 \dots \epsilon H$, где ϵH – значение ϵ сечения, проходящего через вершину самого низкого выступа, и определить пары значений $tp,1$, ϵ_1 ; $tp,2$, ϵ_2 . Тогда b и v могут быть получены в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} t_{p,1} = b\epsilon_1^v \\ t_{p,2} = b\epsilon_2^v \end{cases}$$

Используя соотношение $R_B = s^2 m / (b R_p)$, определить средний радиус кривизны выступов R_B , где R_B – наибольшая высота выступа.

6. Полученные результаты представить в виде таблицы 5.

Таблица 5 — Влияние вида обработки детали на геометрические параметры ее поверхности

Материал образца	Вид обработки	Ra	Rz	R_{max}	S_m	S	R_B	b	v

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.
2. Представить схему испытаний.
3. Получить профилограмму поверхности образцов.
4. Провести расчет геометрических параметров поверхности.
5. Заполнить таблицу полученных результатов.
6. Построить опорную кривую профиля поверхности.
7. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется шероховатость поверхности по ГОСТ 2789–73?
2. Как проводят среднюю линию профиля?
3. Как строится опорная кривая профиля поверхности?
4. Какой должна быть опорная кривая профиля поверхности, обеспечивающая наименьшие контактные напряжения при соприкосновении с гладкой плоскостью?

3. Изучение изменений микрогеометрии в процессе контактного взаимодействия и ее влияния на параметры трения

Цель работы: определить характер влияния параметров шероховатости на коэффициент трения и скорость изнашивания, установить закономерности изменения топографии поверхности в процессе динамического контакта.

Задание: изучить влияние параметров шероховатости на коэффициент трения и скорость износа; определить изменение микрогеометрии поверхностей образцов в процессе трения.

Оборудование и материалы: машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1; профилометр-профилограф ПРОФИ-130; набор образцов; весы аналитические WA-31; секундомер.

Общие сведения

Вследствие деформируемости реальных тел их контакт осуществляется не в точке, а внутри некоторой области контакта, которая при наличии микрорельефа поверхности (волнистости, шероховатости) состоит из совокупности дискретных пятен контакта. В области взаимодействия поверхностей и в ее окрестности возникает напряженное состояние, которое оказывает существенное влияние на процессы трения и изнашивания. От контактных напряжений зависит состояние поверхности и поверхностных пленок на ней, возникновение адгезионных связей в области взаимодействия, накопление поврежденности поверхностных слоев и их разрушение.

Наибольшая концентрация напряжений достигается вблизи отдельных пятен контакта на расстояниях, соизмеримых с масштабом отдельной неровности (микроуровень). При удалении от поверхности на расстояние, соизмеримое с размером области контакта (макроуровень), на величину и распределение напряжений в большей степени оказывают влияние макроформа и объемные свойства взаимодействующих тел.

В триботехнике рассматриваются некоторые модельные задачи о контактом взаимодействии двух тел (контактные задачи), решения которых могут быть применены для анализа

напряженного состояния тел как на микроуровне (контакт неровностей), так и на макроуровне (взаимодействие зубьев шестерен, деталей шариковых и роликовых подшипников и т. д.) Задачи о контакте двух сфер и двух цилиндров, относятся к контактными задачам для тел несогласованной формы. Характерной особенностью контакта тел несогласованной формы является то обстоятельство, что их первоначальный контакт (при нулевой нагрузке) осуществляется в точке (точечный контакт) или по линии (линейный контакт). Так, в шарикоподшипнике контакт между шариком и обоймой – точечный, а в роликовом подшипнике имеет место линейный контакт между цилиндрическим роликом и кольцом. В отличие от контакта тел согласованной формы, имеющих очень близкие очертания и соизмеримую с размерами тел область взаимодействия (примером могут служить плоские скользящие опоры, подшипники скольжения и т.д.), область контакта между телами несогласованной формы, как правило, мала, по сравнению с размерами самих тел. Вблизи этой области (при контактном взаимодействии) возникает высокая концентрация напряжений, которая определяется главным образом геометрическими и механическими характеристиками тел в окрестности области контакта. Конфигурация тел вдали от области контакта практически не влияет на характер распределения контактных напряжений.

На микроуровне модельные задачи о взаимодействии двух тел цилиндрической или сферической формы могут быть использованы для анализа напряжений в области контакта (двух неровностей) на поверхностях взаимодействующих тел, которые часто моделируются с выступами сферической формы, или двух волн (контакт двух цилиндров).

Решения контактных задач позволяют изучить зависимость контактных характеристик (контактные давления, форму и размер области контакта, сближение тел) и напряженного состояния вблизи области взаимодействия от нагрузки, приложенной к контактирующим телам, формы поверхностей, механических свойств взаимодействующих тел и условий контакта (наличия трения, сцепления и т. д.).

Порядок выполнения работы

Изучение влияния параметров шероховатости на коэффициент трения и скорость износа

1. Установить образец с известной микрогеометрией поверхности (использовать образцы, изучение которых проводилось при выполнении работы 2) в машину трения СМТ-1.

2. Включить машину (Приложение 1) при заданных режимах (давлении, скорости скольжения) и определить значение коэффициента трения.

3. Выполнить пп. 1 и 2 для других образцов с известной микрогеометрией поверхности (по указанию преподавателя).

4. Результаты испытаний представить в виде таблицы 6.

Таблица 6 — Влияние вида обработки поверхности детали на коэффициент трения и скорость износа

Вид обработки поверхности	P_z	b	N	V_c	P_c	f	L

5. По данным, внесенным в таблицу 6, построить графики зависимости $f(P_z)$ при различных V_c и P_c . Сделать вывод о характере зависимостей.

Изучение изменений микрогеометрии поверхности в процессе трения

1. Получить профилограмму для данного образца. Определить основные параметры шероховатости поверхности (R_a , R_z , s_m).

2. Установить образец в машину трения СМТ-1 и провести испытание при заданных режимах.

3. Периодически через равные промежутки времени снимать профилограмму поверхности. Профиль желательно определять для одного и того же участка. Рассчитать параметры шероховатости согласно п. 1.

4. Методом взвешивания определить износ тела за время трения.

5. Результаты испытаний представить в таблице 7.

Таблица 7 - Влияние времени трения на коэффициент трения и скорость износа

Время трения	R_a	R_z	S_m	V_c	P_c	f	L

6. По формуле $P_{ск} = 0,065HB$ для данного материала определить критическое значение давления $P_{ск}$, при превышении которого наблюдается пластический ненасыщенный контакт.

7. По полученным данным построить графики зависимостей, сделать вывод о характере изменений этих величин в процессе трения при P_c , $P_{ск}$ и $P_c < P_{ск}$.

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.
2. Заполнить таблицу результатов испытаний.
3. Построить графики зависимостей $f(P_z)$ при различных V_c и P_c .
4. Получить профилограмму образца до испытаний.
5. Произвести расчет основных параметров шероховатости поверхности.
6. Получить профилограммы через равные промежутки времени испытаний на машине трения СМТ-1.
7. Произвести расчет основных параметров шероховатости поверхности после испытаний.
8. Заполнить таблица результатов испытаний.
9. Произвести расчет критического значения давления для данного материала.
10. Построить графики зависимостей параметров шероховатости от времени испытаний.
11. Сделать заключение.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение нормальной, контурной и фактической площадей контакта. Какие существуют экспериментальные методы их определения?
2. Как влияют параметры шероховатости на коэффициент трения?
3. Предложите и обоснуйте способ расчета величины износа по изменению шероховатости контактирующих поверхностей.

4. Изучение влияния различных режимов нагружения и материалов на коэффициент трения твердых тел

Цель работы: экспериментально изучить влияние режимов нагружения на коэффициент трения деталей из различных материалов.

Задание: ознакомиться с настоящими методическими рекомендациями; определить изменение коэффициента трения образцов при испытании с изменением режимов нагружения; построить графики зависимостей коэффициента трения от нагрузки и частоты вращения на валу машины трения; провести математическую обработку результатов исследования.

Оборудование и материалы: машина трения СМТ-1; штангенциркуль; образцы.

Общие сведения

Первые результаты исследования трения твердых тел были обнаружены в трудах Леонардо да Винчи. Была выявлена пропорциональность сопротивления трения нагрузке, действующей на трущиеся поверхности. Кроме того, было отмечено, что тела с шероховатой поверхностью имеют большее сопротивление трения. Г. Амонтон в 1699 г. предложил записывать формулу для определения коэффициента трения в виде:

$$f_T = F_T / P,$$

где F_T – сила трения; P – приложенная по нормали к поверхности трения нагрузка, сжимающая взаимодействующие при трении твердые тела.

Это выражение получило название *закона Амонтона*.

Важнейший вклад в развитие науки о трении твердых тел внесли работы известного французского ученого Ш. Кулона. Он установил не менее знаменитый закон для внешней силы трения, носящий его имя, в виде:

$$F_T = A + f_T' P,$$

где A – характеристика сцепляемости между взаимодействующими твердыми телами при трении, не

зависящая от нагрузки; f_T' – одна из составляющих коэффициента трения; P – нагрузка.

Наиболее полно и завершено молекулярная теория трения получила развитие в трудах Б.В. Дерягина. Он дал новое обоснование, построенное на учете молекулярной шероховатости поверхностей взаимодействующих твердых тел, являющейся следствием дискретной структуры вещества. При расчете сил трения предполагается, что расположение и размеры атомов и молекул контактирующих тел не меняются, а целостность каждого тела обеспечивается силами межатомного и межмолекулярного взаимодействия, т. е. силами притяжения и отталкивания.

Предложенная И.В. Крагельским теория внешнего трения объясняла силу трения также двумя причинами:

1) силой сопротивления движению одного из взаимодействующих тел относительно другого, обусловленную межатомными и межмолекулярными взаимодействиями в зонах фактического касания твердых тел (молекулярная составляющая силы трения);

2) внедрением при контактировании отдельных микронеровностей более жестких тел в поверхность менее жестких тел. При относительном перемещении внедрившиеся микронеровности деформируют (передеформируют) поверхностные слои менее жесткого тела. Сила сопротивления, возникающая при этом, называется деформационной составляющей силы трения.

Следует отметить, что при трении кроме механических имеют место тепловые, электрические, магнитные и другие явления.

Взаимодействие контактирующих тел при скольжении друг относительно друга называется трением скольжения. Наряду с этим различают трение покоя, когда относительная скорость контактирующих тел равна нулю.

По кинематическому признаку внешнее трение подразделяют на трение: скольжения, качения и верчения.

При внешнем трении скольжения в случае поступательного движения тела относительная скорость $V_{ск}$ всех точек одного из

взаимодействующих тел практически одинаковая по значению и направлению.

При трении качения можно, по крайней мере, указать одну точку в зоне контакта, в которой относительная скорость скольжения взаимодействующих тел будет равна нулю.

Трение верчения по существу является частным случаем трения скольжения, которое имеет место при вращательном движении одного из контактирующих тел. В этом случае скорости относительного скольжения изменяются, подчиняясь определенной закономерности во всех точках контакта, за исключением точки пересечения площадки контакта с осью вращения; если взаимодействующие твердые тела совершают сложное движение, то преобладающим будет трение скольжения, т. е. во всех точках контакта относительная скорость скольжения будет отлична от нуля, хотя и неодинакова по значению.

Под внешним трением будем понимать комплекс явлений в зонах контактов микронеровностей двух скользящих друг относительно друга твердых тел, связанных с возникновением силы трения.

Кроме деления трения на внешнее и внутреннее важным является деление внешнего трения на сухое и граничное. Как показывает практика, сила взаимодействия при сухом трении обычно выше, чем при граничном.

Сила трения вызывает не только диссипацию энергии (фрикционные потери), но и существенно влияет на изнашивание взаимодействующих твердых тел. Поэтому в инженерной практике обычно используют комплекс мероприятий, приводящих к уменьшению силовых взаимодействий при трении.

Под силой трения при скольжении твердых тел друг относительно друга (сила внешнего трения) F_T понимают силу сопротивления относительному скольжению контактирующих твердых тел, лежащую в плоскости их касания. Сила внешнего трения:

$$F_T = F_{T\text{мол}} + F_{T\text{мех}},$$

где $F_{Тмол}$ – составляющая силы трения, обусловленная межатомным и межмолекулярным взаимодействием; $F_{Тмех}$ – механическая составляющая силы трения, обусловленная деформированием (передеформированием) поверхностных слоев менее жесткого твердого тела внедрившимися микронеровностями более жесткого тела.

Порядок выполнения работы

1. Выбрать образец и схему испытаний ранее использованные в лабораторной работе 1, установить образец (ролик диаметром $D = 40$ мм и высотой $h = 12$ мм) на валу машины трения (Приложение 1). Протереть тампоном, смоченным в растворителе, поверхности трения образцов. Установить образец в держателе машины.

2. Включить машину трения (Приложение 1).

3. Резисторами установить частоту вращения вала $n = 240$ мин⁻¹ (скорость скольжения $V = 0,5$ м/с).

4. Установить держатель с образцом на вал каретки и задать нагрузку $N = 100$ Н.

5. Скорректировать частоту вращения вала и осуществить приработку поверхностей трения в течение 15 мин.

6. Установить значения N и V (см. таблицу 5.1) и записать момент трения, соответствующий каждому значению N и V . Продолжительность изнашивания и регистрации момента трения для каждого из заданных значений N и V должна быть не менее 5 мин.

7. Используя полученные при выполнении лабораторной работы №1 тарировочные графики, определить значения момента трения и коэффициента трения для различных значений N и V . При обработке кривой записи момента трения выбрать для каждого фиксированного значения N и V семь значений момента трения и рассчитать.

8. Определить среднее значение f по формуле:

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i ,$$

где $n = 7$ – число параллельных измерений.

9. Рассчитать несмещенную выборочную дисперсии:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f)^2$$

10. Определить доверительный интервал $\Delta = tS / \sqrt{n-1}$, используя критерий Стьюдента t . Для 95 %-ного доверительного интервала и $n = 7$ величина $t = 2,45$. Тогда с вероятностью $P = 0,95$ доверительный интервал:

$$\Delta = f - 2,45S / \sqrt{n-1}$$

11. Рассчитать значения f и Δ для различных режимов нагружения. Полученные данные представить в виде таблицы 8.

В зависимости от материала образца режимы нагружения могут быть изменены.

Таблица 8 - Влияние режимов нагружения на коэффициент трения

N, H	50	100	150	200	100			
$V, \text{ м/с}$	0,5				0,1	0,3	0,6	1,0
$M, \text{ Н}$								
m								
f								
Δ								

12. Построить графики зависимостей $f=f(N)$ и $f=f(V)$. На графиках указать доверительные интервалы.

13. Построить линии равных коэффициентов трения для различных значений N и V . Для этого:

- параллельно оси скоростей на графиках $f = f(V)$ построенных для различных значений N , провести сечение, соответствующее $f = 0,2$;

- выбрать значения N и V , соответствующие точкам пересечения секущей линии с кривыми $f = f(V)$, построить соответствующие им точки в системе $N-V$;

- построить линию равных значений коэффициентов трения по точкам в системе $N-V$;

– по описанной методике построить линии равных значений для других двух величин коэффициента трения.

14. Уменьшить площадь поверхности трения образца до $A_a = 1,5 \text{ см}^2$ и определить коэффициент трения при $N = 100 \text{ Н}$ и $V = 0,5 \text{ м/с}$.

15. Определить f при $N = 100 \text{ Н}$ и $V = 0,5 \text{ м/с}$ для площади A_a образца, равной 1 см^2 .

16. Рассчитать коэффициенты взаимного перекрытия для $A_a = 2; 1,5; 1 \text{ см}^2$ по формуле $k_{вз} = A_a / (\pi Dh)$.

17. Данные по $k_{вз}$ и f представить в виде таблицы 9.

Таблица 9 - Зависимость коэффициента трения от коэффициента взаимного перекрытия

$A_a, \text{ см}^2$	2	1,5	1,0
$k_{вз}$			
f			

18. Сделать вывод о влиянии конструктивных параметров узла трения на его фрикционные характеристики.

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.

2. Заполнить таблицу результатов «Влияние режимов нагружения на коэффициент трения» для металлов и пластмасс.

3. Построить графики для $f = f(N)$ и $f = f(V)$ металлов и пластмасс.

4. Получить линии равных коэффициентов трения в координатах $N-V$ для металлов и пластмасс.

5. Заполнить таблицу «Зависимость коэффициента трения от коэффициента взаимного перекрытия» для образцов.

6. Сделать заключение.

Контрольные вопросы

1. Опишите теорию внешнего трения.

2. Какие виды трения существуют?

3. Перечислите составляющие силы внешнего трения.

5. Сравнение триботехнической эффективности различных смазочных масел и присадок

Цель работы: определить смазочную способность масел и присадок при одинаковых условиях работы узла трения; научиться подбирать наиболее подходящий смазочный материал для заданных условий трения.

Задание: ознакомиться с общими сведениями по работе; провести испытание образцов с применением различных смазок и присадок; обработать данные по результатам испытания; оформить отчет о проведенной работе.

Оборудование, приспособления, инструмент: машина трения СМТ-1; образцы из стали 45 ГОСТ1050–94; смазочные материалы: индустриальное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4–87 и моторное масло М-8В1 ГОСТ 10541–78; ветошь; бензин (ГОСТ 443–76); ацетон (ГОСТ 2603–79); весы аналитические WA-31.

Общие сведения.

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности подвижных сопряжений деталей машин и механизмов и минимизации энергетических потерь при их эксплуатации является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов.

Смазочными материалами (СМ) называются продукты органического и неорганического происхождения, которые вводят между поверхностями с целью уменьшения потерь на трение в этом сопряжении, износа пар трения и предотвращения заедания. Благодаря тому, что внутреннее трение в смазочных материалах существенно меньше, чем внешнее трение несмазанных деталей, исключение или минимизация непосредственного контакта пар трения приводит к улучшению фрикционно-износных характеристик сопряжения.

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

В условиях жидкостной или газовой смазки при рабочих режимах полностью исключен непосредственный контакт

трущихся тел. Он возможен только при пусках и остановках. Внешнее трение твердых тел отсутствует, его заменяет внутреннее трение смазочной среды, составляющей слой, разделяющий эти тела в большинстве узлов трения жидкостная смазка, обеспечивающая полное разделение рабочих поверхностей контактирующих деталей в процессе эксплуатации, осуществляется под действием давления, создаваемого в слое жидкости, ограниченном этими поверхностями, при их относительном перемещении. Скорость течения представляет собой сумму скоростей вязкого течения с линейным профилем скоростей по толщине слоя и скорости течения, вызванной градиентом давления, развиваемого в слое жидкости, с параболическим профилем скоростей течения. Это обеспечивает постоянство расхода жидкости по длине зазора, а развиваемое давление обеспечивает несущую способность смазочному слою.

Если геометрия контакта и условия работы узла трения не обеспечивают реализацию жидкостной смазки, то разделение контактирующих поверхностей и устранение (или локализацию) металлического контакта обеспечивают граничные слои, образующиеся на поверхностях трения в результате взаимодействия активных компонентов смазочного материала с поверхностными слоями трущихся тел.

Такой режим смазки называют *граничным*.

Смешанная (полужидкостная) смазка – режим смазочного действия, при котором существует частично гидродинамическая или эласто-гидродинамическая, частично граничная смазка.

Смешанная смазка чаще всего возникает в узлах трения, предназначенных для работы в условиях гидродинамической смазки, вследствие нарушений по разным причинам условий ее образования.

Одним из свидетельств существования такого режима является разрыв смазочного слоя на некотором угле поворота вала, возникающий в шатунном подшипнике двигателя внутреннего сгорания.

При измерении толщины смазочного слоя с помощью емкостного датчика в момент контакта шероховатостей

поверхности происходит замыкание измерительной цепи. Более детальный анализ зоны контакта показывают периодические контакты – разрывы смазочного слоя, свидетельствующие о режиме существования смешанной смазки.

Однако режим смешанной смазки имеет место в небольшой зоне, в которой расчетная толщина смазочного слоя меньше критической.

Режим смазки, характеризующий в целом эти процессы, можно назвать *комбинированной смазкой*, при которой существует одновременно гидродинамическая и смешанная смазки, дающие результирующую несущую способность $P\Sigma$. Газовая смазка (ГС) – смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется газом, в качестве которого применяют в основном воздух, азот, неон и хладон, а также газы с очень низким коэффициентом вязкости (водород). ГС применяется в узлах трения точных приборов, аппаратуре ядерных установок, ультрацентрифугах, газовых турбинах, турбокомпрессорах.

Порядок выполнения работы

1. Изготовить образец для испытаний согласно размерам, представленным в лабораторной работе № 1, установить образец (ролик) на вал машины трения (Приложение 1). Протереть последовательно бензином и ацетоном поверхности трения образцов. Установить образец (колодку) в держателе машины.

2. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в лабораторной работе № 1, исключая операции по тарировке системы измерения момента трения).

3. Резисторами установить частоту вращения вала $n = 240$ мин⁻¹ (скорость скольжения $V = 0,5$ м/с).

4. Установить держатель с образцом на вал каретки и задать нагрузку $N = 100$ Н.

5. Включить подачу одного из масел.

6. Регистрировать по потенциометру, используя полученные при выполнении лабораторной работы № 1 тарировочные графики, температуру и момент трения через каждые 2 минуты.

7. Повторить п.п. 5 и 6 с новым образцом и другим маслом.
8. После окончания испытаний выключить машину.
9. Рассчитать коэффициент трения.
10. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытаний для всех смазок.
11. Сделать вывод о наиболее подходящей смазке для данных условий трения.
12. Подготовить отчет.

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.
2. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытания для всех указанных смазок.
3. Сделать заключение.

Контрольные вопросы

1. Укажите основные функции смазки в узлах трения.
2. Каковы преимущества и недостатки жидких смазок по сравнению с пластичными?
3. Перечислите физико-химические характеристики смазочных материалов.
4. Каково назначение присадок?
5. Каков критерий выбора оптимальной смазки для работы в конкретных условиях?

6. Изучение влияния вида трения на износостойкость твердых тел

Цель работы: изучить износостойкость металлических образцов и образцов из полимерных материалов при трении без смазки, в смазке с абразивом и в чистой смазке.

Задание: ознакомиться с общими сведениями по работе; провести испытание образцов при различных видах трения; подобрать оптимальные пары трения для каждого вида трения; оформить отчет о проведенной работе.

Оборудование и материалы: машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1; кварцевый песок ГОСТ 2138–56 двух фракций: до 5 мкм и более 5 до 35 мкм; образцы (ролики) из стали 45 ГОСТ 1050–94 и чугуна СЧ 20 ГОСТ 1412–85 «сырых» и упрочненных ЭМО; образцы (колодки) из чугуна СЧ 20 «сырого» и с наклеенной полимерной лентой Ф4К15М5 ТУ 6-05-05-138; смазочный материал индустриальное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4–87; весы аналитические WA-31; секундомер.

Общие сведения

При исследовании явления трения между двумя твердыми телами различают три основных вида трения по наличию смазочного материала: сухое, граничное и жидкостное.

Сухое трение проявляется при взаимном относительном движении двух твердых тел, находящихся в естественном контакте друг с другом, когда смазка между их поверхностями отсутствует.

Граничное трение – трущиеся поверхности разделены тончайшим слоем смазки толщиной от 0,1 до 1 мкм и находятся под действием молекулярных сил этих поверхностей.

Жидкостное трение – трущиеся поверхности разделены толстым слоем смазки.

При всех видах трения проявляется абразивное изнашивание поверхностей деталей трибосопряжений.

Абразивному изнашиванию подвержены детали и узлы трения большинства машин и оборудования, применяемых в горнорудной промышленности, сельском хозяйстве, буровое

оборудование и инструмент, рабочие органы и ходовая часть строительно-дорожной и транспортной техники, дробильно-размольные, смесительные машины и оборудование перерабатывающих производств и т. д.

Отличительным признаком абразивного изнашивания является участие в процессе твердых частиц, обладающих различной структурой, формой, размерами, твердостью, прочностью, незначительной адгезией к трущимся поверхностям. Трение в присутствии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов твердых частиц с изнашивающейся поверхностью, широким спектром и высокой концентрацией напряжений, физико-химической активацией поверхностей твердых тел.

По характеру силового воздействия абразива на трущиеся детали различают:

- скольжение детали по монолитному абразиву;
- качение детали по абразиву;
- соударение с частицами абразива;
- соударение детали с монолитным абразивом;
- воздействие потока абразивных частиц на поверхность детали (гидроабразивное и газоабразивное изнашивание);
- скольжение детали в массе абразивных частиц;
- взаимодействие сопряженных деталей в контакте с абразивными частицами.

Каждый вид взаимодействия обуславливает присущее ему напряженно-деформированное состояние, степень активизации и последующее разрушение поверхности детали. Разрушение поверхности может быть результатом одноактного взаимодействия абразива с поверхностью (срезание стружки) или многоактного процесса деформирования поверхности абразивными частицами. Учитывая различия в механизмах разрушения поверхностей, классифицировать материалы по их способности сопротивляться абразивному изнашиванию не представляется возможным.

Исследования изнашивания материалов по корундовому полотну, проведенные М. Хрущовым, показали, что относительная износостойкость чистых металлов в

ненаклепанном состоянии и сталей в отожженном состоянии прямо пропорциональна твердости материала: $\varepsilon \sim HB$. Для термообработанных сталей характерна зависимость:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha(HB - HB_0),$$

где ε_0 – относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; α – коэффициент пропорциональности; HB_0 – твердость стали в отожженном состоянии кроме того процессы абразивного изнашивания зависят от формы и размеров абразивных частиц.

Проблема создания и применения новых антифрикционных материалов, видов обработки и подбора оптимального сочетания пар трения для различных узлов трения, работающих в самых различных условиях, имеет актуальное значение для повышения качества, надежности и долговечности машин и агрегатов и значительного снижения затрат, связанных с их ремонтом.

В настоящее время известно большое количество материалов, пригодных для изготовления трущихся деталей. Наибольший интерес представляют антифрикционные материалы, которые дают возможность эксплуатировать узлы трения в условиях граничной смазки или без нее. Среди таких материалов наиболее эффективными и перспективными являются полимеры и композиции на их основе. Представителями этой группы материалов являются **фторопласты**.

Фторопласты и композиции на их основе широко применяются в машиностроении для изготовления антифрикционных изделий. Коэффициент трения фторопластов, в особенности политетрафторэтилена (Ф-4), при трении по металлу очень низок: не превышает обычных коэффициентов трения смазываемых металлических пар трения.

Наиболее распространенным полимером является материал Ф4К15М5. Он состоит из фторопласта-4, 5% дисульфида молибдена и 15% коксовой муки. Считается, что Ф4К15М5 обладает наиболее благоприятными показателями износа и трения. Изготавливается в виде ленты толщиной 1,7 мм, шириной 140 мм, подготовленной к склеиванию. Температурный диапазон -260...+260°С.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить образец для испытаний согласно размерам, представленным в Приложении 1. Взвесить образцы на аналитических весах. Установить образец на валу машины трения. Протереть последовательно бензином и ацетоном поверхности трения образца. Установить в держателе машины колодку.

Примечание: В ходе испытаний использовать следующие комбинации пар трения, которые записать в таблице результатов в следующей последовательности: 1 чугун(сырой)-чугун; 2 чугун(ЭМО)-чугун; 3 сталь 45(ЭМО)-чугун; 4 чугун(ЭМО)- Ф4К15М5; 5 сталь 45(ЭМО)- Ф4К15М5.

2. Подготовить смазочный состав в зависимости от вида трения. При трении в чистой смазке в масляную ванну налить масло для обеспечения окунания ролика и наличия постоянной смазочной пленки между поверхностями образцов. При трении в смазке с абразивом применять индустриальное масло с добавлением кварцевого песка. Из расчета 14% содержания кварцевого песка от общего объема масла.

3. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в Приложении 1, исключая операции по тарировке системы измерения момента трения).

4. Резисторами установить частоту вращения вала $n = 240$ мин⁻¹ (скорость скольжения $V = 0,5$ м/с).

5. Установить держатель с колодкой на вал каретки и задать нагрузку $N = 10$ Н.

6. Регистрировать по потенциометру, используя полученные при выполнении лабораторной работы 1 тарировочные графики, момент трения.

7. Последовательно повторить п. 5 для нагрузок 20, 30, 40, 50 Н. Рассчитанные значения коэффициента трения занести в таблицу.

8. Повторить п.п. 5 и 6 с новыми образцами при других режимах трения.

9. После окончания испытаний выключить машину.

10. Взвесить образцы и сравнить износ образцов в различных комбинациях и различных режимах трения.

11. Построить графики изменения коэффициента трения от времени испытаний.

12. Сделать вывод о наиболее подходящей паре трения для работы при определенном виде трения. Подготовить отчет о работе.

Отчет о работе

1. Записать название, цель работы и применяемое оборудование.

2. Заполнить таблицу результатов испытаний.

Таблица 10 – Влияние комбинаций пар трения и вида трения на момент трения

Время, мин	№ комбинации материалов	Момент трения в зависимости от способа трения		
		Мтр (без смазки), Нм	Мтр (смазка с абразивом), Нм	Мтр (чистая смазка), Нм
1	2	3	4	5
1	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
2	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

3. Построить графики зависимости коэффициента трения от времени испытания.

4. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Укажите существующие виды трения.

2. Каково назначение антифрикционных материалов?

3. Перечислите достоинства фторопластов.

4. Что такое абразивное изнашивание?

3 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Что такое «Трибология»?

а) это наука о трении, износе, смазке и взаимодействии контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении

б) это техническая наука управления трением путём подбора пар трения, конструкций узлов и правильной их эксплуатации

в) это раздел триботехники, который изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Рассматривает законы рассеяния энергии, импульса, а также механическое подобие, релаксационные колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и др. применительно к задачам трения, изнашивания и смазки

2. Что такое «Трибосопряжение»?

а) это сложная термодинамическая система, в которой происходит преобразование энергии механического движения в другие виды (теплоту, колебания и др.) с передачей преобразованной энергии внешней среде

б) это сложная термодинамическая система, образующаяся при взаимодействии трущихся тел, а также промежуточной среды и частиц окружающей среды, обеспечивающая проявление характеристик трения, изнашивания, теплообразования и структурно-фазовых превращений.

в) это тонкий рабочий слой в зоне контакта пары трения, имеющий особые свойства, отличные от свойств исходных тел, с продуктами износа и обычно со смазочным материалом

3. Что такое «Антифрикционность»?

а) свойство трибосистемы обеспечивать состояния с приемлемо высокими значениями сил трения

б) это свойство трибосистемы, при котором реализуются устойчивые состояния с приемлемо низкими значениями сил трения

в) свойство трибосистемы обеспечивать состояния с приемлемо высокими износа деталей трибосопряжения

4. Свойство трибосистемы обеспечивать состояния с приемлемо высокими значениями сил трения – это:

- а) антифрикционность
- в) фрикционность
- г) трибомеханика

5. Коэффициент сцепления – это:

а) безразмерная величина, равная отношению силы трения к нормальной нагрузке

б) отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной силе, относительно поверхности трения, прижимающей тела друг к другу

в) безразмерная величина, равная отношению момента трения качения к нормальной нагрузке

6. Безразмерная величина, равная отношению силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу - это

- а) коэффициент трения скольжения
- б) коэффициент трения качения
- в) коэффициент трения

7. Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Величина может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

- а) изнашивание
- б) износ
- в) износостойкость
- г) коррозия

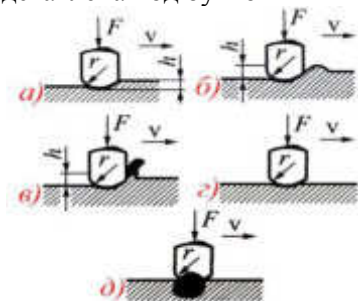
8. Какая межатомная связь устанавливается за счет образования устойчивых электронных конфигураций путем обобществления электронов отдельными атомами?

- а) ионная
- б) ковалентная (гомеополярная)
- г) металлическая
- д) Ван-дер-Ваальсова

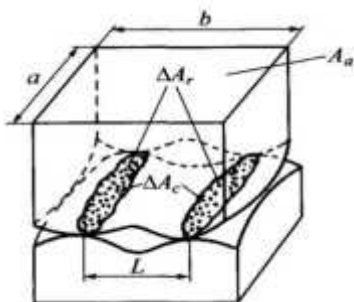
9. Совокупность неровностей с относительно малым шагом $l = 2 \dots 800 \text{ мкм}$ и высотой $H_{\text{max}} = 0,025 \dots 320 \text{ мкм}$, образующих рельеф поверхности детали и рассматриваемых на определенной базовой длине $l/H_{\text{max}} < 50 \text{ мкм}$

- а) волнистость
- б) шероховатость
- в) дефектность

10. Фрикционная связь (*упругое оттеснение*) на рисунке представлена под буквой



11. На рисунке представлен контакт шероховатых поверхностей. Под буквой A_r различают следующую площадь касания



- а) номинальная
- б) фактическая
- в) контурная
- г) нормальная

12. Гидродинамический эффект возникает вследствие В этом случае внутри масляного клина возникает добавочное давление, способное уравновесить плавающий вал.

- а) затягивания в сужающийся зазор масла
- б) выдавливания из сужающего зазора масла
- в) внутреннего давления жидкости
- г) внешнего давления жидкости

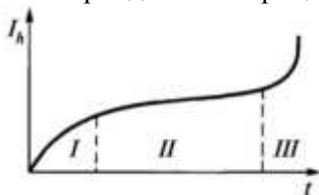
13. При качении упругого колеса по упругому полупространству сопротивление качению F_k обусловлено тремя причинами (указать несколько ответов)

- а) гистерезисными потерями
- б) микропроскальзыванием в зоне контакта
- в) силы тяжести
- г) адгезией в контактной зоне
- д) сопротивление среды

14. Отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходит изнашивание, или объему выполненной работы, или к величине работы (энергии), затраченной за период изнашивания это -

- а) интенсивность истирания
- б) интенсивность устаревания
- в) интенсивность изнашивания
- г) интенсивность деформирования

15. На рисунке представлена кривая В.Ф. Лоренца которая характеризуется тремя периодами. II период это -



- а) период установившегося изнашивания
- б) период приработки
- в) период катастрофического изнашивания
- г) период без изнашивания

16. Процесс образования и исчезновения пузырьков в жидкости вследствие местного изменения давления на поверхности твердых тел при этом происходит их эрозия – это:

- а) абразивное изнашивание
- б) усталостное изнашивание
- в) кавитационное изнашивание
- г) адгезионное изнашивание
- д) эрозионное изнашивание

17. Присадки, улучшающие смазочные свойства масел.

- а) противопенные
- б) противоизносные и противозадирные
- в) многофункциональные
- г) вязкостные

18. Материалы, которые используют в узлах трения, передающих или рассеивающих кинетическую энергию движущихся масс (в тормозах, муфтах, сцеплениях, демпферах, вариаторах и др.).

- а) антифрикционные материалы
- б) фрикционные материалы
- в) динамические материалы

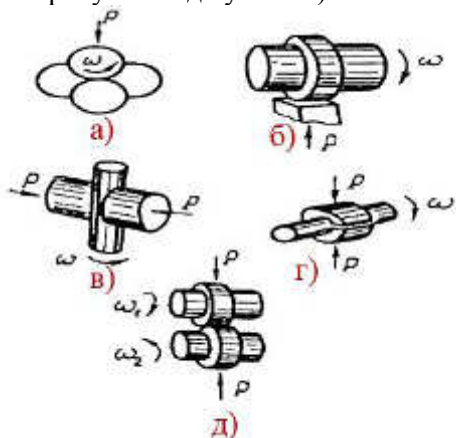
19. У антифрикционных материалов коэффициент трения f равен ...

- а) $>0,2$
- б) $0,2$
- в) $<0,2$
- г) $0,1$

20. Различные химические соединения, составляющие незначительную долю ($0,002...5\%$), но резко улучшающие свойства масел (касторовое, вазелиновое масла, глицерин, олеиновая, стеариновая кислоты и т.д.).

- а) примеси
- б) коагулянты
- в) катализаторы
- г) присадки

21. Какая схема контактов образцов при трибоиспытаниях представлена на рисунке под буквой г)?



- а) четырёхшариковая
- б) схема Тимкен (кольцо-брус)
- в) Фалекс (валик-полувкладыши)
- г) Алмен-Виланд (валик - два V-образных блока)
- д) SAE (два кольца)

22. Механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении это - ...

- а) фиттинг
- б) питтинг
- в) фреттинг
- г) приттинг

23. К пластичным натриевым смазкам относятся...

- а) солидолы
- б) консталины
- в) литолы
- г) фиолы
- д) шрусы

24. К какому способу повышения износостойкости относится метод *правильного выбора вида обработки и шероховатости поверхности*?

- а) конструкционному
- б) технологическому
- в) эксплуатационному
- г) экспериментальному

25. Эксплуатационный способ, повышения долговечности (износостойкости) машин, основанный на приработке в едином комплексе все пары трения, создания в них равновесной шероховатости.

- а) эксплуатационные испытания
- б) обкатка машин
- в) кратковременное испытание на максимальных нагрузках

26. Какие пластические смазки в воде не растворяются, при плавлении теряют содержащуюся в них свободную и связанную воду и начинают распадаться на масло и мыло? После охлаждения их смазочные свойства не восстанавливаются.

- а) кальциевые смазки
- б) натриевые смазки
- в) кальциево-натриевые смазки

27. Что характерно для пары трения при сочетании хрома с бронзой?

- а) пара способствует заеданию и снижается надежность трибосопряжения
- б) пара хорошо противостоит заеданию и характеризуется высокой надежностью
- в) пара трения обладает высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей

28. Процесс упрочнения стальных деталей путем диффузии в поверхностный слой углерода и азота называют

- а) азотированием
- б) цианированием
- в) цементацией

4 СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ПЕРСОНАЛИЙ

1. Внешнее трение - явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

2. 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.

3. Износ - результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Примечание. Значение износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

4. Износостойкость - Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

5. Смазочный материал - материал, вводимый на поверхность трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

6. Смазка - действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшаются износ, повреждения поверхности и (или) сила трения.

7. Смазывание - подведение смазочного материала к поверхности трения.

8. Трение покоя - трение двух тел при микросмещениях без макросмещения.

9. Трение движения - трение двух тел, находящихся в движении относительно друг друга.

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

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

12. Трение скольжения - трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.

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

14. Трение качения с проскальзыванием - трение движения двух соприкасающихся тел при одновременном трении качения и скольжения в зоне контакта.

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

16. Наибольшая сила трения покоя - сила трения покоя, любое превышение которой ведет к началу макросмещения.

17. Предварительное смещение - относительное микросмещение двух твердых тел при трении в пределах перехода от состояния покоя к относительному движению.

18. Скорость скольжения - разность скоростей тел в точках касания при скольжении.

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

20. Поверхность трения - поверхность тела, участвующая в трении.

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

22. Механическое изнашивание - изнашивание в результате механических воздействий.

23. Коррозионно-механическое изнашивание - изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

24. Абразивное изнашивание - Механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц.

25. Гидроэрозионное (газоэрозионное) изнашивание - изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа).

26. Гидроабразивное (газообразное) изнашивание - абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа).

27. Усталостное изнашивание - механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя.

Примечание. Усталостное изнашивание может происходить как при трении качения, так и при трении скольжения

28. Кавитационное изнашивание - механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление или высокую температуру.

29. Изнашивание при заедании - изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.

30. Окислительное изнашивание - коррозионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

31. Изнашивание при фреттинге - механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении

32. Изнашивание при фреттинг-коррозии - коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

33. Электроэрозионное изнашивание - эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

34. Предельный износ - износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части.

35. Допустимый износ - значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность.

Примечание. Допустимый износ меньше предельного

36. Местный износ - износ на отдельном участке поверхности трения.

37. Эпюра износа - графическое изображение распределения значений местного износа по поверхности трения или по определенному ее сечению.

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

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

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

Примечания:

Единицу объема выполненной работы выбирают в каждом отдельном случае.

Различают мгновенную и среднюю интенсивности изнашивания.

40. Скачкообразное движение при трении - явление чередования относительного скольжения и относительного покоя или чередования увеличения и уменьшения относительной скорости скольжения, возникающее самопроизвольно при трении движения.

Примечание. Примером скачкообразного движения может служить движение, возникающее вследствие автоколебаний при понижении коэффициента трения с увеличением скорости скольжения

41. Схватывание при трении - явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

42. Перенос материала - явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другими и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

43. Заедание - Процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала.

Примечание. Заедание может завершаться прекращением относительного движения

44. Задир - повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

45. Царапание - образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц.

46. Отслаивание - отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

47. Выкрашивание - образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

48. Приработка - процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

49. Газовая смазка - смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей осуществляется газовым смазочным материалом.

50. Жидкостная смазка - смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей осуществляется жидким смазочным материалом.

51. Твердая смазка - смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется твердым смазочным материалом.

52. 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.

53. 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.

54. Эласто-гидродинамическая смазка - смазка, при которой характеристики трения и толщина пленки жидкого смазочного материала между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются

упругими свойствами материалов тел, а также реологическими свойствами последнего.

55. Граничная смазка - смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемной вязкости.

56. Полужидкостная (смешанная) смазка - смазка, при которой осуществляется частично гидродинамическая, частично граничная смазки.

57. Циркуляционное смазывание - смазывание, при котором смазочный материал после прохождения по поверхностям трения вновь подводится к ним механическим способом.

58. Одноразовое проточное смазывание - смазывание, при котором смазочный материал периодически или непрерывно подводится к поверхности трения и не возвращается в систему смазки.

59. Ресурсное смазывание - одноразовое смазывание на ресурс узла перед началом работы.

60. Смазывание под давлением - смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхности трения под давлением.

61. Смазывание погружением - смазывание, при котором поверхность трения полностью или частично, постоянно или периодически погружена в ванну с жидким смазочным материалом.

62. Смазывание кольцом - смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхностям трения кольцом, увлекаемым во вращение валом.

Примечание. Кольцо может быть закреплено на валу.

63. Капельное смазывание - смазывание, при котором к поверхности трения подводится жидкий смазочный материал в виде капель.

64. Смазывание масляным туманом - смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхности трения в виде легкого или густого тумана, обычно образуемого путем введения смазочного материала в струю воздуха или газа.

65. Смазывание набивкой - смазывание, при котором жидкий смазочный материал подводится на существенном участке

поверхности с помощью соприкасающегося с ней смачиваемого материала, обладающего капиллярными свойствами.

66. Фитильное смазывание - смазывание, при котором жидкий смазочный материал подводится к поверхности трения с помощью фитиля.

67. Ротапринтное смазывание - смазывание, при котором на поверхность детали наносится твердый смазочный материал, отделяющийся от специального смазывающего твердого тела, прижимаемого к поверхности.

68. Смазывание твердым покрытием - смазывание, при котором на поверхности трения до работы детали наносится смазочный материал в виде твердого покрытия.

69. Смазочное масло - очищенное масло, предназначенное для уменьшения трения между движущимися поверхностями.

70. Базовое масло - смазочное масло, к которому добавляется одна или несколько присадок с целью получения готового продукта.

71. Пластичный смазочный материал ПСМ - полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями с возможным содержанием других компонентов.

72. Минеральный смазочный материал – смазочный материал минерального происхождения, полученный смешением углеводородов в естественном состоянии или полученный в результате обработки минеральных продуктов.

73. Нефтяной смазочный материал - очищенное масло, полученное из нефтяного сырья.

74. Присадка к смазочному материалу - вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или усиления существующих.

75. Связующее твердого смазочного материала - вещество, способствующее сцеплению частиц твердого смазочного материала между собой и поверхностью трения.

76. Антикоррозионная присадка - присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая коррозию смазываемых металлических поверхностей.

77. Антиокислительная присадка - присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая окисление смазочного материала.

78. Противоизносная присадка - присадка, препятствующая или уменьшающая скорость или интенсивность изнашивания трущихся поверхностей.

79. Противозадирная присадка - присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая заедание трущихся поверхностей.

80. Депрессорная присадка - присадка, понижающая температуру застывания жидкого смазочного материала.

81. Присадка, улучшающая индекс вязкости - присадка, обычно полимер, понижающая степень изменения вязкости с изменением температуры и увеличивающая в связи с этим индекс вязкости масла.

82. Противопенная присадка - присадка, уменьшающая или препятствующая образованию стойкой пены в жидком смазочном материале.

83. Моющая присадка - поверхностно-активное вещество, помогающее удерживать твердые частицы в масле во взвешенном состоянии.

84. Диспергирующая присадка - присадка к жидкому смазочному материалу, повышающая дисперсность нерастворимых загрязнений и стабильность суспензий преимущественно при низких температурах.

85. Противоржавейная присадка - присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая время образования ржавчины на поверхностях деталей и сплавов на основе железа.

86. Многофункциональная присадка - присадка, улучшающая одновременно несколько свойств смазочного материала.

87. Композиция присадок - смесь нескольких присадок, готовых к добавлению в смазочный материал.

88. Совместимость смазочных материалов - способность двух или нескольких смазочных материалов смешиваться между собой без ухудшения их эксплуатационных свойств и стабильности при хранении.

89. Консистенция смазочного материала - свойство пластичных смазочных материалов оказывать сопротивление деформации при внешнем воздействии.

90. Вязкость - объемное свойство жидкого, полужидкого и полутвердого вещества оказывать сопротивление при трении. Вязкость уменьшается при повышении температуры.

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

92. Индекс вязкости - безразмерная величина, характеризующая по стандартной шкале изменение вязкости масла в зависимости от температуры.

93. Совместимость при трении - свойство материалов, сопряженных поверхностей предотвращать схватывание при трении.

94. Прилегаемость при трении - свойство материала при трении увеличивать поверхность трения упругим и пластическим деформированием поверхностного слоя.

95. Способность к поглощению твердых частиц - свойство материала поглощать твердые частицы, чтобы уменьшить их царапающее или режущее действие.

96. Прирабатываемость - свойство подшипникового материала уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки.

97. Износостойкость материала - свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения.

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

Примечание. Обычно один из материалов принимается за эталон

Словарь терминов и персоналий составлен в соответствии с ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Аюгин Н.П. Курс лекций по дисциплине «Триботехника» / Н.П. Аюгин, Р.Ш. Халимов, Г.Г. Минибаев. - Ульяновск, ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013, 122 с.
2. Гаркунов Д.А. Триботехника (износ и безызносность) / Д.Н. Гаркунов. – М: Машиностроение, 2001. – 616 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Краткий курс / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. - М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. - 344 с.
4. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования, 1997. – 15 с.
5. ГОСТ 23.204-78. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении. М.: Издательство стандартов, 1979. – 7с.
6. ГОСТ 23.208-79. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. М.: Издательство стандартов, 1980. – 8с.
7. ГОСТ 23.224-86. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М.: Издательство стандартов, 1986. - 23с.
8. Заславский, Ю.С. Трибология смазочных материалов / Ю.С. Заславский. – Москва : Химия, 1991. – 286 с.
9. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
10. Куксенова, Л.И. Методы испытаний на трение и износ / Л.И. Куксенова. - Москва: Интернет Инжиниринг 2001. – 152 с.
11. Машина для испытаний материалов на трение и износ. Заводское обозначение 2070 СМТ-1.- Инструкция по эксплуатации. Союзточмашприбор.- Завод испытательных приборов, Иваново, 1987.
12. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.Н. Петроковец. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
13. Пенкин Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. - М: Машиностроение, 2008. - 206 с.

14. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
15. Сорокин В.М. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин: курс лекций / В.М. Сорокин, А.С. Курников. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2006. – 296 с.
16. Тихомиров В.П. Трибология / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, В.В. Порошин. - М: МГИУ, 2002. -224 с.
17. Хебда М. Справочник по триботехнике / М. Хебда, А.В. Чичинадзе - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.
18. Халимов Р.Ш. Новые методы получения направленного регулярного микрорельефа поверхностей трения // Материалы международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». – Санкт - Петербург: СпГПУ (НПФ “Плазмацентр”), 2008. – С. 159–164.
19. Халимов Р.Ш. Результаты лабораторно-экспериментальных исследований образцов материалов по схеме трения “вал - неполный вкладыш” после электромеханической обработки / Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки и образования». - Ульяновск: УГСХА, 2008. - С. 96 – 102.
20. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии. Учебник для технических вузов / А.В. Чичинадзе. – Москва :Машиностроение, 2001. – 664 с.
21. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общей ред. А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2003. – 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Подготовка к работе и настройка машины трения 2070 СМТ-1.

1. Подготовка к работе

Машина позволяет проводить испытания с различными образцами, нагрузками и частотой вращения образцов, а также коэффициентами проскальзывания. Кроме того, работа может вестись как в камере с различными смазками, так и без камеры. Поэтому в независимости от поставленной перед испытателем задачей перед испытанием необходимо провести подготовку машины.

Общими операциями до установки образцов являются:

- установка диапазона частоты вращения образцов, которую производят, сменяя шкив на электродвигателе согласно маркировке на шкиве и таблице на крышке;
- установка необходимого шпинделя;
- подключение воды для охлаждения подшипников каретки и шпинделя;
- подготовка к работе электрооборудования.

1.1. Подготовка электрооборудования

Установите переключатель рода работы на пульте управления (Рисунок 23) в положение «Работа», переключатель счетчика числа оборотов в положение «Включено».

Включением выключателя 2 подайте напряжение на блок тиристорного привода, схему управления, схему измерения момента и нагрузки, при этом загорится лампа 17. Установите блок переключателей 13 «Освещение камеры» в положение «Вкл». Кнопкой 5 «Пуск» запустите в работу электродвигатель привода машины.

Лампа 6 сигнализирует о подключении электродвигателя к сети. В зависимости от рода испытаний установите блоки переключателей в нужное положение:

- «Диапазон момента» 12;
- «Частота вращения» 18;
- «Нагрузка» 24 или 25.

Перед началом испытаний прогрейте измерительную схему машины в течение 30 минут. После прогрева установите на нуль стрелку потенциометра 14 измерения момента резистором 11

«Установка нуля» и указателя нагрузка 23 одним из резисторов, расположенных внутри блока 21.

1.2. Работа с образцами «диск-диск»

Установите требуемый коэффициент проскальзывания сменой шкива 7 (рисунок 24).

Наденьте крышку 20 (рисунок 25) на вал каретки перед установкой верхнего образца при работе в жидкой среде.

Установите образцы. При затягивании гаек, крепящих образцы, удерживайте вал вторым ключом. Если не удерживать вал вторым ключом, может произойти *поломка датчика момента*.

Гайка вала каретки имеет левую резьбу. При затягивании гаек не прилагайте большего усилия, так как при работе гайки самозатягиваются.

Биение образцов проверяйте индикатором.

Наименьшего биения добивайтесь поворотом образца.

После этого сдвиньте каретку в левое положение и на винт 22 (рисунок 26) наденьте петлю троса 23 уравнивания, **ПЛАВНО** опустите каретку до соприкосновения образцов, зафиксируйте ее от осевого перемещения и закрепите крышку камеры.

1.3. Подготовка к работе с образцами «диск-колодка»

Проводится аналогично подготовке к работе по схеме «диск-диск», дополнительно выполните следующее:

- расцепите полумуфту 30 и заведите болт 29 в паз стойки 22 (рисунок 26);
- установите на валу каретки колодку 5 в держателе (рисунки 27 и 28).

1.4. Подготовка для работы по схеме «вал-втулка»

1. Поднимите каретку в верхнее положение;
2. Расцепите муфту привода каретки (см. п. 1.3);
3. Установите образец «вал» на вал шпинделя и закрепите его гайкой;
4. Наденьте на образец «вал» обойму с закрепленным в обойме образцом «втулка»;
5. Обойму зафиксируйте в испытательной камере (см. описание работы с испытательной камерой);
6. Закройте испытательную камеру крышкой 25 (рисунок 25).

1.5. Порядок работы

В процессе работы машину обслуживает один лаборант. Поскольку методы испытаний на машине не стандартизованы, параметры испытаний выбирайте в зависимости от задачи, поставленной перед испытанием, или методики испытаний, принятой в организации, эксплуатирующей машину.

Каретку до соприкосновения образцов опускайте плавно, не допуская ударов.

Удары могут вызвать неисправимое биение образцов. Нагружение образцов усилием P ведите плавно вращая винт нагружения при вращающемся образце, наблюдая за величиной момента трения по потенциометру.

При испытании образцов с высоким коэффициентом трения образцы дополнительно законтрите.

Не перегружайте машину моментом свыше установленного диапазона 10 или 20 Н·м.

При смене испытанных образцов пользуйтесь съемником.

Запрещается работать на резонансных режимах и режимах близких к резонансу, а также с образцами, имеющими биение более 0,1 мм.

2. Регулирование и настройка

2.1. Настройка частоты вращения нижнего образца

Для измерения частоты вращения нижнего образца во время испытания используйте вольтметр 20 (рисунок 23).

Указатель частоты вращения имеет два предела измерения: от 150 до 1500 мин⁻¹ или от 75 до 750 мин⁻¹.

При измерении частоты вращения от 150 до 1500 мин⁻¹, переключатель указателя частоты вращения $B5$ поставьте в положение «10», а при частоте вращения до 750 мин⁻¹, переключатель $B6$ – в положение «x5». Для определения частоты вращения нижнего образца умножьте показание по указателю частоты вращения на множитель переключателя $B5$ или $B6$.

Частоту вращения настраивайте следующим образом.

Включите машину и задайте частоту вращения 1500 мин⁻¹, резисторами $R1$ и $R2$, расположенными на лицевой стороне пульта управления. Переключатель указателя частоты вращения $B6$ поставьте в положение «x10». Резистором $R4$,

расположенным внутри выдвижного блока, установите стрелку указателя частоты вращения на отметку 150. Задатчиком частоты вращения $R1$ установите частоту вращения 1500 мин^{-1} и проверьте истинную частоту вращения нижнего образца. Если она отличается от заданной, подкорректируйте показания указателя частоты вращения V резисторами $R1$ и $R2$.

Задатчиками частоты вращения $R1$ и $R2$ установите по указателю частоты вращения 750 мин^{-1} и переключатель указателя частоты вращения $B5$ поставьте в положение «х5». Резистором $B3$ установите стрелку указателя частоты вращения на отметку 150, что соответствует частоте вращения 750 мин^{-1} .

После настройки резисторы $R3$ и $R4$ законтрите.

2.2. Настройка измерения момента трения

Стрелку шкалы потенциометра ЭП1 установите на нуль с помощью резисторов «Установка нуля» $R11$ «Грубо», $R12$ «Плавно» (рисунок 23). На подвес 10 приспособления положите груз массой 5 кг, создающий момент 20 Н·м.

Переключатель диапазонов установите в положение «х2».

При этом стрелка потенциометра должна показать 98–100 делений шкалы. Если показания стрелки не будут соответствовать указанному диапазону шкалы (больше или меньше), то с помощью резистора «Установка предела» $B19$ установите необходимый диапазон 98–100 делений по шкале потенциометра.

Снимите грузы и проконтролируйте нуль на шкале потенциометра ЭП1. Проконтролируйте при моменте 20 Н·м принятый диапазон. Диапазон измерения момента считается установленным, если при нулевой нагрузке стрелка потенциометра находится на нуле, а при моменте 20 Н·м – на заданном значении шкалы потенциометра в пределах погрешности. Снимите грузы, проконтролируйте нуль шкалы потенциометра, невозвращение на нуль должно быть в пределах погрешности. На подвеску приспособления положите груз массой 2,5 кг, создающий момент 10 Н·м. Установите переключатель диапазонов в положение «х1». При этом стрелка потенциометра должна показать 98–100 делений.

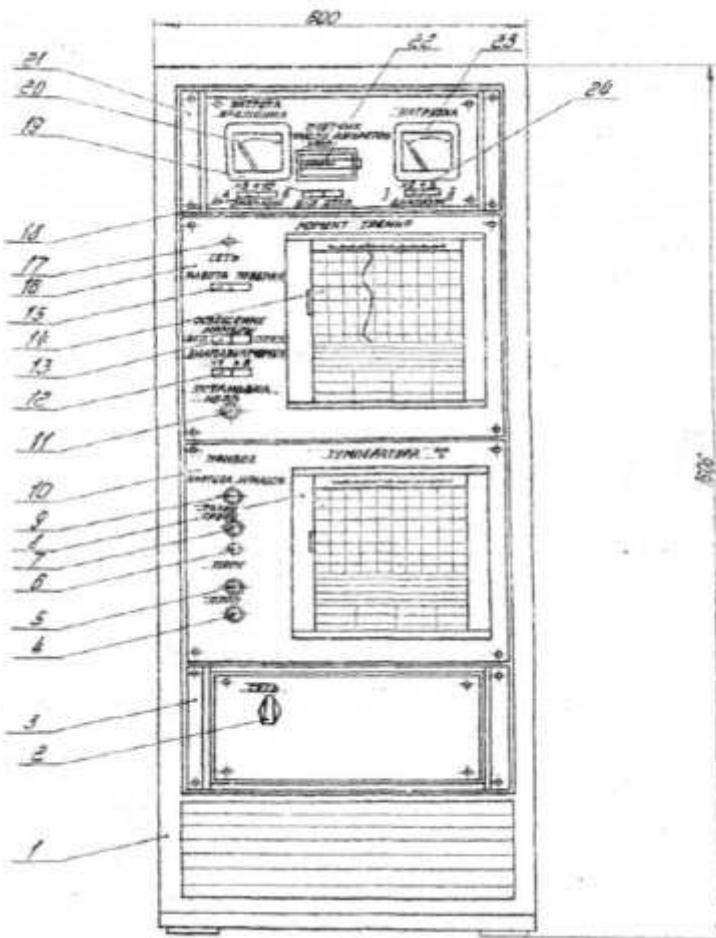


Рисунок 23 – Пульт управления:

- 1 – стойка; 2 – выключатель; 3 – блок; 4 – кнопка; 5 – кнопка;
 6 – лампа; 7 – резистор; 8 – потенциометр; 9 – резистор;
 10 – панель; 11 – резистор; 12 – блок переключателей; 13 – блок переключателей;
 14 – потенциометр; 15 – блок переключателей;
 16 – панель; 17 – лампа; 18, 19, 24 – блоки переключателей;
 20 – вольтметр; 21 – блок; 22 – счетчик; 23 – микроамперметр

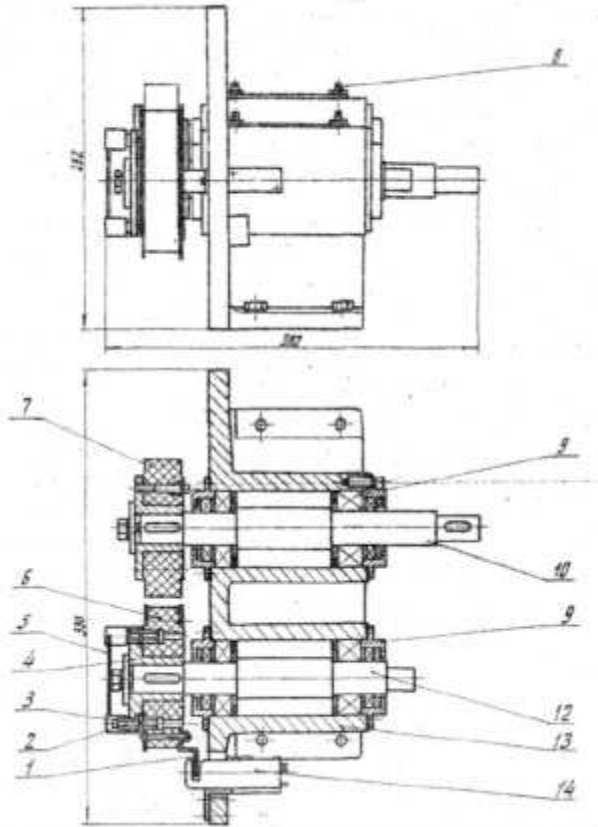


Рисунок 24 – Бабка привода:

- 1 – флажок; 2 – штифт предохранительный; 3 – гайка;
 4 – втулка; 5 – проволока; 6 – шкив; 7 – шкив; 8 – шприц-
 масленка; 9 – подшипник; 10 – вал; 12 – вал; 13 – корпус;
 14 – датчик

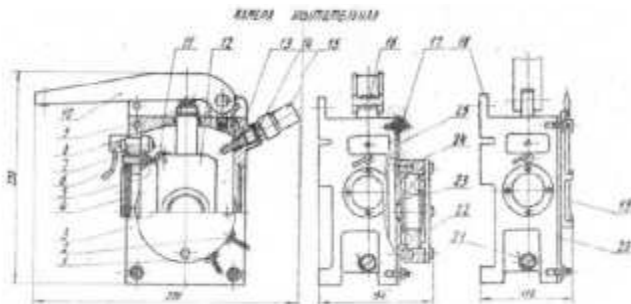


Рисунок 25 – Камера испытательная:

- 1 – штуцер; 2 – штуцер; 3 – крышка; 4 – окно; 5 – упор; 6 – привод;
 7 – осветитель; 8 – уплотнение; 9 – толкатель; 10 – рычаг;
 11 – подшипник; 12 – обойма; 13 – трубка; 14 – штуцер;
 15 – колпак; 16 – подушка; 17 – винт откидной; 18 – корпус;
 19 – замок клиновой; 20 – крышка; 21 – пробка; 22 – подшипник;
 23 – уплотнение; 24 – камера охлаждения; 25 – крышка

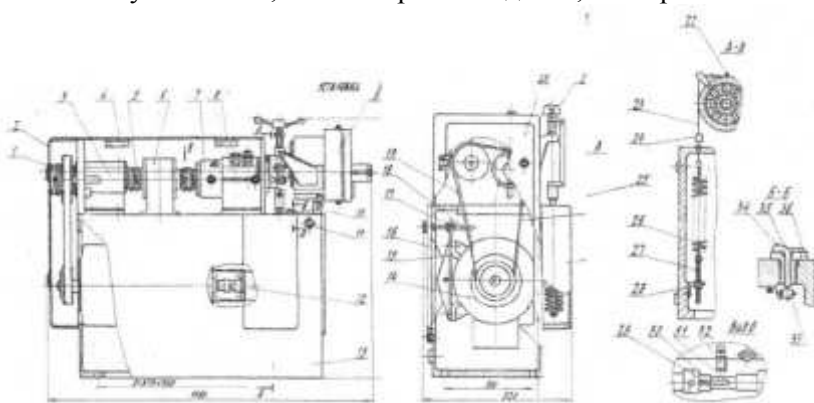


Рисунок 26 – Установка испытательная:

- 1 – гайка; 2 – кожух; 3 – бабка; 4 – кожух; 5 – муфта; 6 – датчик; 7 – шпindelь; 8 – бабка нижнего образца; 9 – каретка; 10 – фиксатор; 11 – кнопка «Стоп»; 12 – тахогенератор; 13 – станина; 14 – электродвигатель; 15 – плита; 16 – плита; 17 – гайка; 18 – винт; 19 – ремень; 20 – крышка; 21 – винт; 22 – винт; 23 – трос; 24 – упор; 25 – механизм нагружения; 26 – пружина; 27 – винт; 28 – гайка; 29 – болт; 30 – полумуфта; 31 – вал каретки; 32 – стойка; 33 – микропереключатель; 34 – пружина; 35 – штифт; 36 – корпус зажима

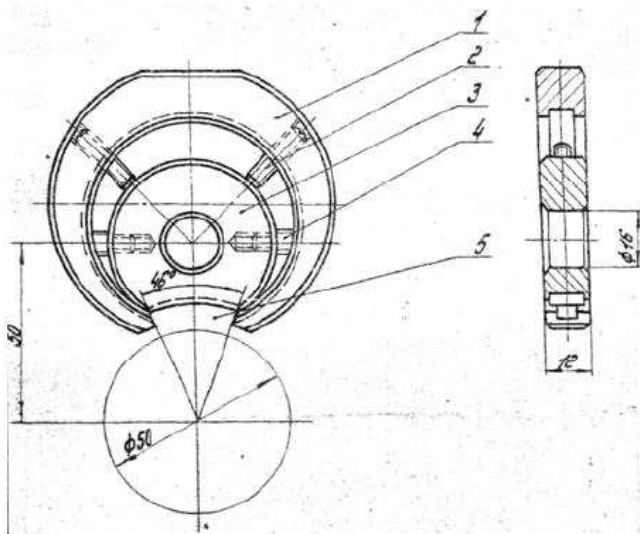


Рисунок 27 – Держатель:

1 – хомут; 2 – винт; 3 – палец; 4 – винт; 5 – колодка

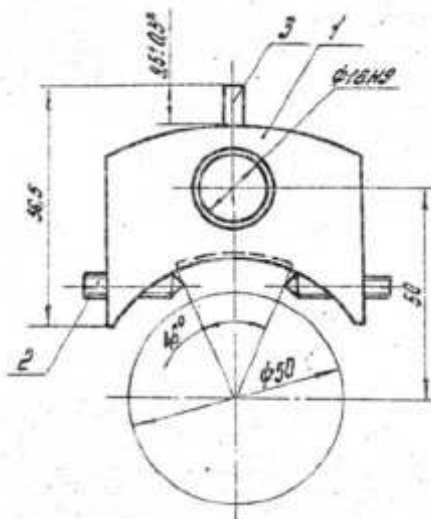


Рисунок 28 – Держатель:

1 – корпус; 2 – винт М6х25.66.05 ГОСТ 1476–75; 3 – штифт
5Гх16.013 ГОСТ 3128–70

Приложение 2

Таблица 11 – Классы износостойкости узлов трения машин, аппаратов, приборов

Класс износостойкости	Интенсивность изнашивания (<i>I</i>)		Вид контактного взаимодействия поверхностей
	от	до	
Нулевой Первый Второй	10^{-13} 10^{-12} 10^{-11}	10^{-12} 10^{-11} 10^{-10}	Упругое
Третий Четвертый	10^{-10} 10^{-9}	10^{-9} 10^{-8}	Упруго-пластическое
Пятый Шестой Седьмой	10^{-8} 10^{-7} 10^{-6}	10^{-9} 10^{-6} 10^{-5}	Пластическое
Восьмой Девятый Десятый	10^{-5} 10^{-4} 10^{-3}	10^{-4} 10^{-3}	Микрорезание (хрупкое и вязкое разрушение)

ДЛЯ ЗАМЕТОК

**Петряков Сергей Николаевич
Аюгин Николай Петрович**

ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ

(учебное пособие)

для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» - Димитровград: Технологический институт – филиал УлГАУ, 2019.- 188 с.