

Ю.Е. Кирпиченко
А.Ф. Трофименко

ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ

**ТЕОРИЯ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
УПРАЖНЕНИЯ**

ББК 34.41
УДК 620.179.112

Кирпиченко Ю.Е., Трофименко А.Ф. Основы трибологии: Теория. Лабораторный практикум. Упражнения.— Гомель.: Инфотрибо, 1995. —224 с.

В книге изложены современные научные положения о теоретических и экспериментально-практических основах трения, изнашивания и смазки. Приведен лабораторный практикум, позволяющий получить навыки оценки фрикционных и служебных свойств триботехнических материалов. Представлен перечень упражнений, решение которых дает возможность изучить методику расчета трибологических характеристик некоторых узлов трения.

Предназначена для студентов и полезна аспирантам и преподавателям технических вузов.

Рецензент — д-р. техн. наук, профессор П.В. Сысоев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоятельная потребность широкого использования в технике достижений науки о трении обусловили введение курса трибологии в программу обучения студентов машиностроительных специальностей ряда промышленно развитых стран. При составлении материала книги принимались во внимание учебные планы и программы, используемые в Республике Беларусь и странах СНГ.

С учетом прикладной направленности курса трибологии предлагаемое учебное издание содержит лабораторный практикум, сборник упражнений и краткую теоретическую часть справочного характера.

Выполнение лабораторного практикума дает возможность получить основные навыки в экспериментальной оценке фрикционных и служебных свойств трибосопряжений на различного типа машинах трения и приборах.

Приведенные упражнения и методы их решения призваны формировать представления о возможностях расчетных методов оценки триботехнических параметров узлов трения.

Необходимый минимум сведений об основных понятиях трибологии для проведения лабораторных работ и расчетов содержится в теоретической части (главы 1—6).

Более полную информацию по всем разделам трибологии можно получить из многочисленных монографий, учебников и справочников, изданных на территории бывшего СССР, список которых дан в конце книги. Кроме того, для изучающих курс будет полезна информация о стандартах, разработанных в области трибологии, содержащаяся в приложении.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальными задачами современного машиностроения являются повышение уровня надежности, долговечности и экономичности машин и механизмов. Решение этих задач в значительной степени связано с совершенствованием работы узлов трения, имеющих в машинах и механизмах. Проведенные исследования показали, что 80—90% отказов машин связаны с износом трущихся сопряжений, а потери средств при этом в машиностроении развитых стран достигают 4—5% величины их национального дохода.

Наука, изучающая вопросы, связанные с трением, износом и смазкой поверхностей при их относительном перемещении, получила название трибология от греческого слова “трибос”, что означает трение. Термин трибология введен в научную лексику сравнительно недавно в 1966 году, хотя первые исследования в этой области науки были сделаны Леонардо да Винчи. Итальянский ученый разработал первый трибометр — прибор для изучения трения, ввел в инженерный обиход понятие коэффициента трения и предложил состав легкоплавкого металлического сплава для поверхностей трения. Эти и многие другие его открытия намного опередили время. Однако они не нашли своего применения в технике, были забыты и вновь открыты спустя столетия другими исследователями.

Формирование науки о трении началось под влиянием запросов практики. В работах Амонтона, Кулона, Эйлера, Ломоносова, Менделеева, Жуковского, Петрова, Рейнольдса и других ученых в прошлом веке были установлены основные закономерности трибологии, использование которых позволило эффективно бороться с негативными проявлениями трения. Вредное последствие трения выражается в износе и потере энергии. Величина относительного размера предельного износа весьма мала, для некоторых узлов трения составляет несколько микрометров, но этого бывает достаточно для выхода из строя механизма или изделия в целом. Потери на преодоление сил трения составляют 25—30% энергии, вырабатываемой человечеством.

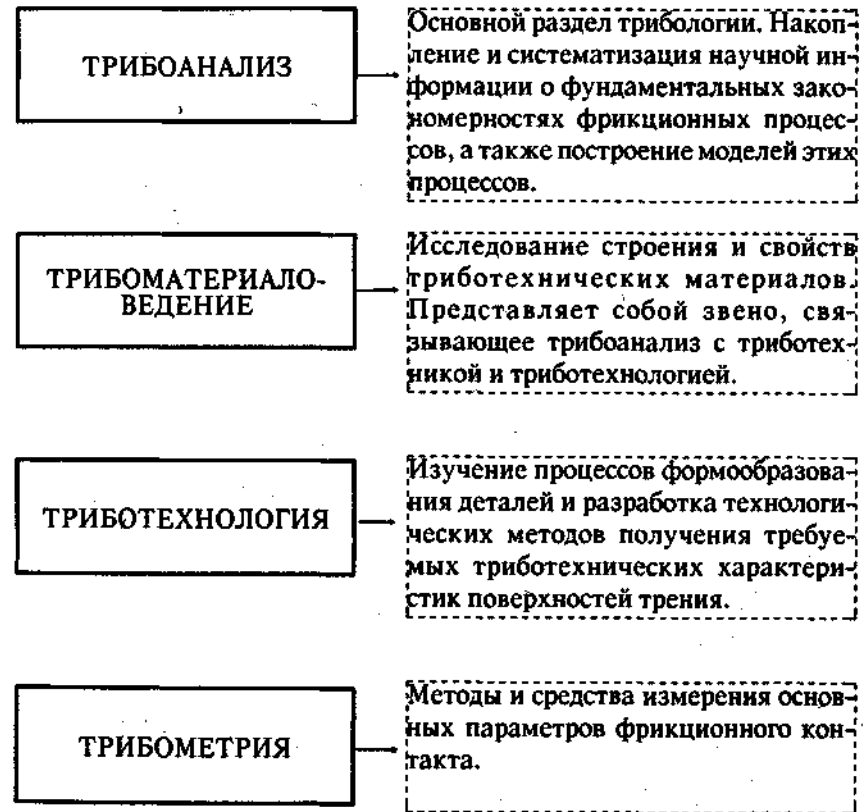
Необходимо отметить и полезную работу сил трения, которая используется в различного рода тормозных устройствах, муфтах и некоторых технологических процессах.

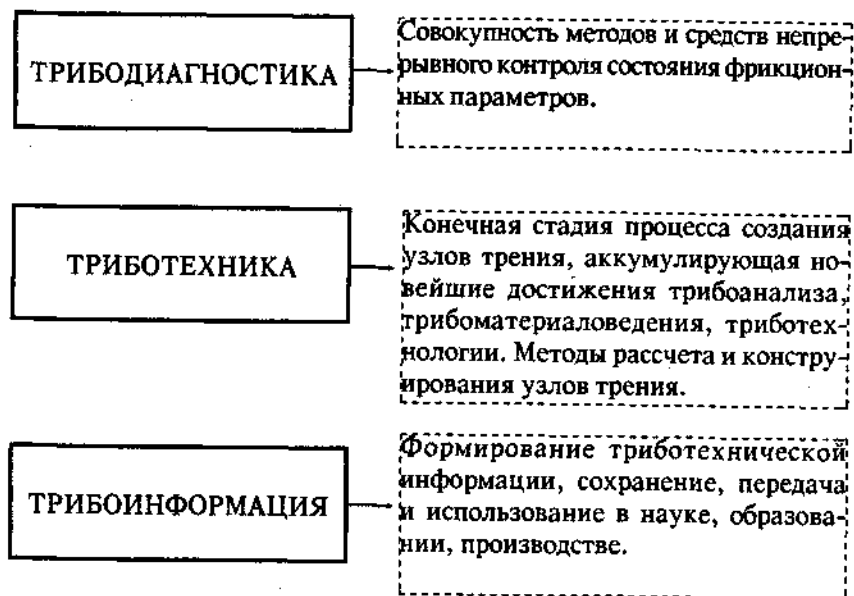
Систематические исследования трибологических вопросов начались с 20-х годов текущего столетия. П.А. Ребиндером был открыт эффект адсорбционного понижения прочности, позднее на основе исследования межмолекулярного взаимодействия Б.В. Дерягиным была предложена теория трения. Дальнейшие исследования механизмов

трения позволили И.В. Крагельскому практически одновременно с английскими исследователями Ф. Боуденом и Д. Тейбором сформулировать адгезионно-деформационную теорию трения, во многом определившей дальнейшее развитие трибологии. В это же время начали свои работы по исследованию граничного трения А.С. Ахматов и В. Гарди, а М.М. Хрущовым заложены основы исследования абразивного изнашивания.

К 60-м годам трибология сформировалась как единая научная дисциплина, имеющая самостоятельные области исследования, такие как контактная механика трения, материаловедение, теория смазки, контактная гидродинамика, теория изнашивания.

В настоящее время основные направления в области трибологии следующие:





Глава 1 ФАКТОРЫ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

1.1. Структура вещества

Агрегатное состояние вещества зависит от величин межатомного взаимодействия и кинетической энергии атомов.

Твердое состояние характеризуется колебанием частиц относительно положения равновесия в его кристаллической решетке на расстояние, не превышающее межатомное при условии, что положения равновесия при данной температуре постоянны. Твердое тело характеризуется стабильностью формы.

В жидком состоянии перемещение частиц осуществляется в виде скачков на расстояния порядка молекулярных размеров; в периоды между скачками молекулы совершают не совсем регулярные колебания. Жидкости сочетают в себе свойства твердых тел и газов.

При газообразном состоянии молекулы газа совершают как вращательное, так и поступательное движения. Высокие температуры, которые могут сообщаться газу, способствуют совершению атомами и молекулами колебательных перемещений.

Различают две разновидности твердых тел, отличающихся своими свойствами — кристаллические и аморфные.

Кристаллические тела при нагреве остаются твердыми до определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние. Переход из одного состояния в другое протекает изотермически при конкретной температуре плавления.

Аморфные тела при нагреве размягчаются. Размягчение происходит в широком интервале температуры. При этом тела становятся вязкими и дальнейший их нагрев сопровождается переходом в жидкое состояние. Аморфное состояние рассматривают как переохлажденную жидкость с сильно пониженной подвижностью частиц.

Кристаллические тела характеризуются упорядоченным расположением в пространстве элементарных частиц (рис. 1.1), из которых они состоят (ионов, атомов, молекул).

Аморфные тела характеризуются хаотичным расположением элементарных частиц.

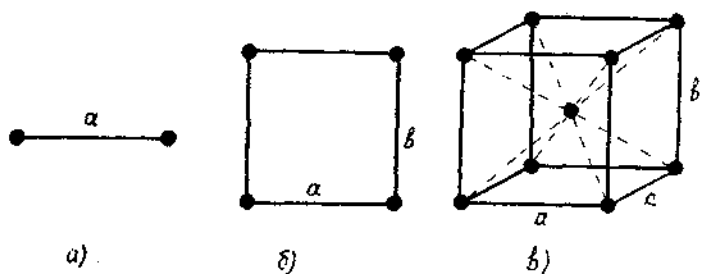


Рис. 1.1. Структура кристаллических решеток:
 а — одномерная, б — двумерная, в — пространственная

В жидком состоянии система характеризуется ближним порядком в расположении атомов, т.е. закономерное расположение распространяется на 2—3 атомных периода.

В газообразном состоянии закономерного расположения атомов не наблюдается.

Металлы — поликристаллические тела, состоящие из большого количества мелких, различно ориентированных по отношению друг к другу, кристаллических зерен-кристаллитов. Размеры кристаллов составляют $10^{-1} \dots 10^{-5}$ см.

В технике широко применяются сплавы металлов. Они имеют характерные свойства, присущие металлическому состоянию. Элементы, образующие сплав, называют компонентами. Сплав может состоять из двух и более числа компонентов.

Упорядоченное расположение в пространстве элементарных частиц приводит к анизотропии свойств, а также к образованию в кристалле плоскостей скольжения, по которым осуществляется смещение элементарных частиц при деформациях и характеризуется минимальной энергией взаимодействия между атомами.

Электронное строение атомов определяет характер межатомного взаимодействия и формирует электрические, тепловые, магнитные и оптические свойства кристаллов.

Энергия такого взаимодействия определяет температуру плавления и испарения, коэффициент сжимаемости и расширения, атомный диаметр, энергию активизации диффузии, модуль упругости.

Механические и физические свойства материалов определяются их структурой. Под структурой понимают строение вещества, которое можно наблюдать по объему всего тела невооруженным глазом (макроструктура) или с помощью микроскопов (микроструктура). Струк-

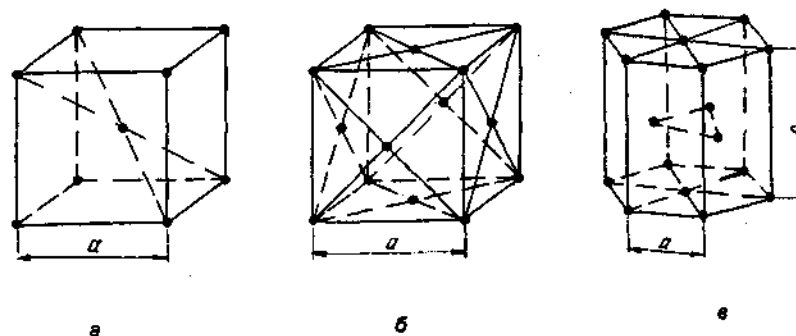


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток металлов:
 а — кубическая объемноцентрированная (ОЦК), б — кубическая гранецентрированная (ГЦК), в — гексагональная решетка с плотной упаковкой атомов (ГПУ)

тура твердого тела исследуется на специальных образцах (шлифованных и протравленных) — шлифах.

Кристаллическую решетку (рис. 1.2) представляют в виде воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки регулярного расположения частиц (ионов, атомов, молекул) в пространстве.

Элементарная кристаллическая ячейка (рис. 1.3) — наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме. Последовательное перемещение ее в про-

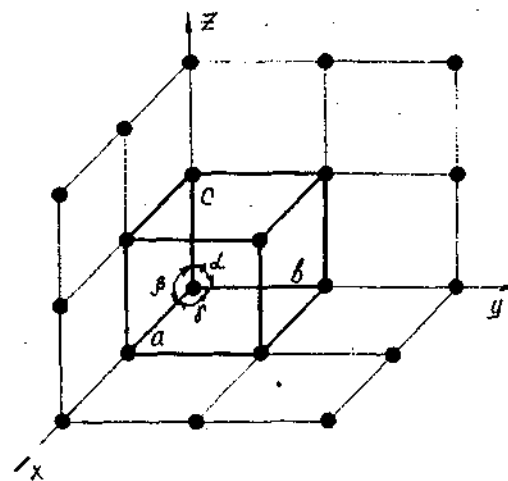


Рис. 1.3. Элементарная кристаллическая ячейка

странстве, параллельно самой себе, образует пространственную кристаллическую решетку.

Представление о кристаллической решетке металла формируется из вида пространственной группы симметрии, параметров электронной ячейки, координат частиц в ячейке и плотности их упаковки.

Характеристикой любой элементарной кристаллической ячейки являются периоды — a, b, c и осевые углы — α, β, γ (рис. 1.3).

Различают следующие типы кристаллической решетки: кубическую ($a=b=c$), тетрагональную ($a=b \neq c$), ромбическую ($a \neq b \neq c$), ромбоэдрическую ($a=b \neq c$), гексагональную ($a=b \neq c$), моноклинную ($a \neq b \neq c$), триклинную ($a \neq b \neq c$). Длина ребра составляет величину порядка 1,2 нм.

Координационное число K характеризует плотность кристаллической решетки и показывает число ближайших атомов или ионов, окружающих данный атом или ион, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома. В кристаллической решетке выделенная любая атомная плоскость (проходящая через атомы) пересекается с осями координат. При этом плоскость отсекает на осях координат отрезки, равные соответствующим целым числам периодов решетки. Обратные им числа обозначают индексами h, k, l . Их называют кристаллографическими индексами атомных плоскостей. Эти числа заключают в круглые скобки. Кристаллы имеют грани с малым числом индексов, например, (100), (010), (001) и др.

Выбор осей координат осуществляют в соответствии с симметрией кристаллов по специальным правилам. При этом кристалл может быть совмещен с самим собой с помощью различных преобразований симметрии (отображений, поворотов, параллельных переносов и др.).

Металлам, имеющим объемноцентрированные и гранецентрированные кубические (ОЦК и ГЦК) структуры, свойственны высокие значения коэффициентов трения и величины износа. Для металлов с гексагональной структурой (ГС) значения этого показателя незначительны.

Это связывают с определенными различиями в механизмах деформации данных кристаллографических структур, т.е. кристаллические решетки в данном случае отличаются различным числом систем легкого скольжения.

Пластическая деформация, в зависимости от количества систем легкого скольжения, может начинаться при меньших напряжениях, т.к. вероятность того, что часть систем имеет ориентацию, благоприятствующую скольжению, будет гораздо выше.

При этом, чем больше систем легкого скольжения имеет данная структура, тем выше склонность к упрочнению, т.к. пересечение плоскостей (образование "леса" дислокаций) препятствует дальнейшему скольжению.

У металлов с гексагональной структурой таких систем легкого скольжения минимум, следовательно, и показатели трения и схватывания ниже.

Превращения, происходящие в кристаллической решетке, оказывают существенные влияния на свойства металла. Переход структуры материала из упорядоченного состояния в состояние с неупорядоченным расположением атомов существенно уменьшает значение силы трения. При наличии резких изменений температуры в зоне контакта и многократно повторяющихся деформаций структура и свойства металла непостоянны.

1.2. Несовершенство реальных кристаллов

Свойства реальных кристаллов отличаются от идеальных. К примеру, пределы прочности и текучести реальных кристаллов в десятки и сотни раз ниже по сравнению с идеальными.

Главной причиной значительного снижения прочности и текучести кристаллов являются дефекты их структуры.

Дефекты кристаллической решетки подразделяются на точечные, линейные и поверхностные.

Точечные дефекты. Данные дефекты (рис. 1.4) значительно малы во всех трех измерениях. Их протяженность не превышает не-

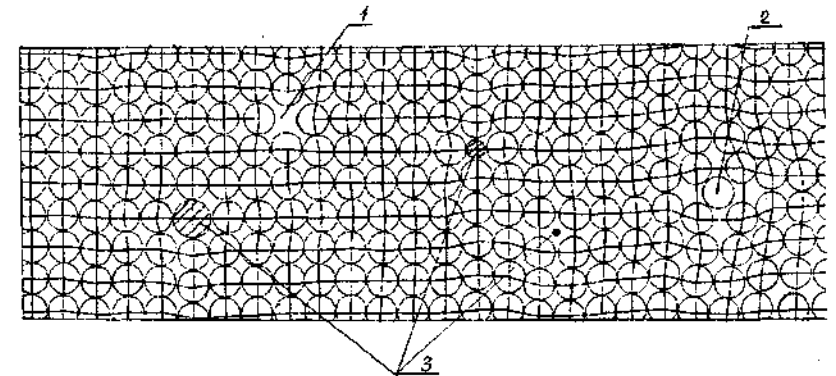


Рис. 1.4. Точечные дефекты в кристаллической решетке: 1 — вакансия, 2 — межузельный атом, 3 — примесные атомы внедрения и замещения

скольких атомных диаметров. Точечные дефекты подразделяются на вакансии (дефекты Шоттки) и межузельные атомы (дефекты Френкеля).

Вакансией называют пустой узел кристаллической решетки, т.е. узел, в котором отсутствует атом. Межузельный атом — это атом, перемещенный из узла решетки в положение между узлами. Размещение примесных атомов осуществляется либо в узлах решетки, либо между узлами. Примесные атомы образуют либо твердые растворы замещения или внедрения.

Точечные дефекты непрерывно перемещаются в решетке.

Причинами образования вакансий являются: нагрев тела, присутствие атомов примесей, пластические деформации, рекристаллизация. Число вакансий и межузельных атомов незначительно и не превышает $\sim 1\%$ от общего числа атомов.

На деформированной поверхности твердого тела и на границах зерен центрами образования вакансий являются активированные атомы.

При трении количество вакансий в тонком поверхностном слое достигает $2,5 \cdot 10^{21}$ атомов/см³.

Если на поверхности трения отсутствует пленка оксида, то источником образования вакансий являются движения дислокации через кристалл.

Образование вакансий предопределяет возможность перемещения атомов в кристаллической решетке на расстояния, превышающие средние атомные. Этот процесс называется диффузией. В зависимости от изменения концентрации диффундирующих атомов различают самодиффузию и гетеродиффузию.

Для обеспечения положительного градиента сдвигового сопротивления, требуемого для осуществления внешнего трения, необходимо, чтобы значительный температурный градиент распределения вакансий по глубине был неравномерным.

Точечные дефекты оказывают влияние на фазовые превращения в металлах и сплавах, а также на электрическую проводимость, магнитные свойства и др.

Влияние точечных дефектов применительно к трению изучено недостаточно.

Линейные дефекты. Они отличаются сравнительно малыми размерами в двух измерениях и большой протяженностью в третьем измерении. Данными несовершенствами могут быть ряд вакансий или ряд межузельных атомов. К важнейшим видам линейных несовершенств относят краевые и винтовые дислокации.

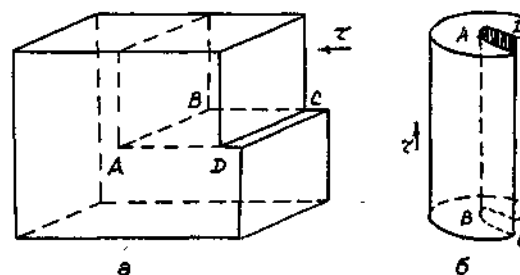


Рис. 1.5. Виды дислокаций: а — краевая (τ — вектор сдвига), б — винтовая

Дислокация — это нарушение правильного чередования атомных плоскостей в кристаллической решетке реального кристалла.

Краевую дислокацию можно представить с помощью дополнительной атомной плоскости ABCD (рис. 1.5, а). Движение дислокации, в данном случае, возможно в случае скольжения в кристалле по данной плоскости. Край дополнительной плоскости AB является линией краевой дислокации. Она простирается вдоль плоскости скольжения (перпендикулярно к вектору сдвига τ). Линия краевой дислокации простирается через всю толщину кристалла. Изображение винтовой дислокации представлено на рис. 1.5, б.

Линии дислокации могут быть замкнутыми, разветвленными или заканчиваться на поверхности кристалла. Линии дислокаций могут пересекаться. Точки пересечения называются узлами дислокаций.

Вокруг дислокаций происходит упругое искажение кристаллической решетки. Эти искажения оцениваются вектором Бюргерса.

Оценку искажения кристаллической решетки, вызванной дислокацией, производят путем сравнения несовершенного кристалла (содержащего дислокацию) с идеальным.

При этом строят контур Бюргерса. Он представляет собой замкнутый контур произвольной формы, который выделяется в реальном кристалле при последовательном обходе дефектов от атома к атому на одинаковое количество атомных периодов.

Вектор Бюргерса получится, если обойти замкнутый контур в идеальном кристалле, идя от узла к узлу, и потом повторить этот же путь в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура. Рис. 1.6 показывает, что в реальном кристалле контур оказывается незамкнутым на одно межатомное расстояние. Вектор, который требуется для замыкания контура, называется вектором Бюргерса. Он

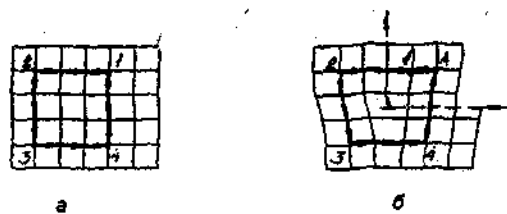


Рис. 1.6. Построение вектора Бюргерса:
 а — замкнутый контур в идеальном кристалле, б — разомкнутый контур в реальном кристалле, 1—А— вектор Бюргерса

характеризует величину и направление сдвига в процессе скольжения, энергию, подвижность и другие свойства дислокаций.

Дислокационная структура характеризуется плотностью деформаций. Под ней понимается суммарная длина дислокаций, приходящихся на единицу объема.

В металлических кристаллах дислокации имеются в огромном количестве ($10^4 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Они достаточно подвижны и способны размножаться.

Плотность дислокаций, их расположение в объеме оказывают большое влияние на механические и другие свойства металлов и сплавов.

Процесс трения двух твердых тел способствует усилению взаимодействия дислокаций и приводит к росту сдвигового сопротивления и упрочнению материала. Холодная механическая обработка и процессы трения увеличивает плотность дислокаций до величины 10^{12} см^{-2} . Ее увеличение связано со структурой кристаллического тела и числом возможных направлений скольжений.

Роль дислокаций велика в механизме образования частиц износа. Большое скопление дислокаций при трении происходит на некотором расстоянии от поверхности. Это вызывает зарождение микропустот, которые, в свою очередь, при дальнейшем своем росте или сдвиге материала приводят к образованию микротрещин.

В настоящее время достаточно полно изучены две их формы: эллиптические трещины Гриффитса и клинообразные трещины Ребиндера.

В свою очередь, протекание пластической деформации в тонких поверхностных слоях контактирующих тел приводит также к увеличению плотностей дислокаций. Это вызывает увеличение твердости материала и, как результат, выкрашивание орупченногo поверхностного слоя.

Поверхностные дефекты. Поверхность контактирующего тела представляет собой основной дефект трехмерной структуры кристаллов. Разрыв периодичности кристаллической решетки приводит к из-

менению координационной сферы поверхности атомов и изменению их связей. Это вызывает изменение порядка в расположении атомов и межатомных расстояний. Измененная структура рассматривается как некоторая поверхностная переходная фаза. Различие межмолекулярных взаимодействий в поверхностной и объемной фазах обуславливает избыток поверхностной энергии. Поэтому часть вещества, находящаяся на поверхности раздела фаз, имеет некоторые особые свойства, отличные от свойств этого вещества в объеме. Данный факт определяет ряд явлений, получивших название "поверхностных" и определяющих адгезию, адсорбцию, эффект Ребиндера и т.п.

Трение осуществляется между реальными конструкционными материалами с сильно дефектной поверхностью. Поверхность кристаллического тела рассматривается как сложная система блоков, фрагментов зерен, выходов отдельных групп дислокаций и всегда имеет шероховатость. Обработанные поверхности имеют значительно больше неровностей по сравнению с естественной поверхностью кристалла. Плотность "упаковки" атомов в объеме вещества меньше поверхностной плотности.

Поэтому формирование новой поверхности в результате трения приводит к тому, что оказавшиеся на ней атомы будут стремиться к более плотному расположению. Это сопровождается появлением в поверхностном слое значительных напряжений, являющихся причиной образования трещин и роста числа дефектов.

К поверхностным дефектам относят поверхности раздела между отдельными зернами или между субзернами, разориентированными относительно друг друга, в поликристаллическом металле, а также трещины и дефекты упаковки.

Границы зерен (рис.1.7) являются переходной областью шириной до 10 межатомных расстояний. В этой области решетка одного кристалла переходит в решетку другого кристалла.

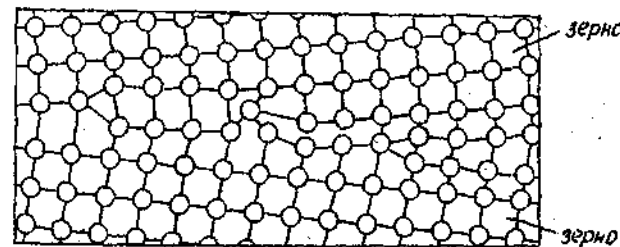


Рис. 1.7. Неправильное расположение атомов на границе зерен

В переходной области (границе зерен) нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, увеличена концентрация примесей, снижающих поверхностную энергию.

Границы зерен оказывают влияние на многие механические характеристики, т.к. они мешают двигаться дислокациям и, кроме того, на границах концентрируются примеси.

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого отрыва.

Физико-механические свойства поверхностных слоев деталей существенно отличаются от объемных свойств материала, из которых они изготовлены.

Контактное взаимодействие твердых тел сопровождается химическими и диссипативными процессами в поверхностных и приповерхностных слоях трущихся материалов. Материал в данных зонах в процессе трения резко изменяет свое физическое состояние. Существенные изменения происходят в суб- и микроструктуре поверхностных микрообъемов.

Структурные, фазовые и диффузионные превращения, прочностные и деформационные свойства поверхности, ее качество оказывают влияние на процессы трения.

1.3. Пластическая деформация кристаллических тел

Под деформацией понимают изменение размеров и формы тела под воздействием приложенных сил. Данные изменения происходят под воздействием внешних сил, приложенных к телу, или различных физико-механических процессах, протекающих в самом теле (например, усадки, фазовых превращений и т.п.). Различают упругую и пластическую (остающуюся после снятия нагрузки) деформации металлов.

Если после прекращения действия внешних сил деформация устраняется (исчезает), то ее называют упругой. Она не связана с заметными остаточными изменениями в структуре и свойствах металла.

В основе пластической деформации лежит сдвиг — необратимое перемещение одной части кристалла по отношению к другой. Пластическое деформирование металлов связано с перемещением дислокаций при любых скоростях и температурах деформирования. Различают две разновидности сдвига: скольжение и двойникование дислокаций (рис. 1.8). Деформация скольжением осуществляется по плоскостям и направлениям, на которых плотность атомов максимальна и сопротивление сдвигу минимальное. Направление, принадлежащее плоскости скольжения и сама плоскость скольжения образуют систему скольжения. Скольжение дислокаций происходит при воздействии

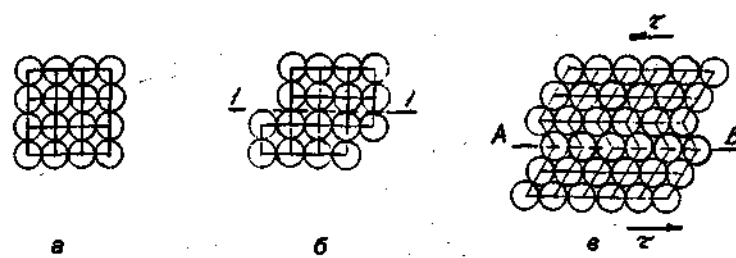


Рис. 1.8. Схемы деформаций:
 a — недеформированное состояние кристалла, b — деформация скольжением ($I-I$ — плоскость скольжения), c — деформация двойникованием (AB — плоскость двойникования)

касательного напряжения, превышающего свое критическое значение.

При деформации двойникованием происходит переориентирование части кристалла в новое положение. Данное положение зеркально симметрично по отношению к недеформированной части. Двойникование по сравнению со скольжением имеет меньшее значение.

Протекание пластической деформации в поликристалле аналогично деформации монокристалла путем сдвига (скольжения) или двойникованием.

Монокристаллы, не имеющие границ зерен, но содержащие дислокации, легко деформируются.

Материалы с поликристаллической структурой состоят из кристаллов, расположенных хаотично, следовательно, и плоскости отдельных кристаллов расположены также беспорядочно, что является препятствием продвижению дислокаций.

При деформировании металла увеличиваются его прочностные характеристики и снижаются вязкость и пластичность.

Холодное пластическое деформирование металла приводит к изменению его физических свойств — плотности, магнитных свойств, электросопротивления.

С ростом степени холодной деформации происходит повышение сопротивления деформации и снижение пластичности. Данное явление носит название наклепа. Наклепанный металл аккумулирует часть энергии, затраченной на его деформирование. Данная энергия расходуется на образование дефектов и на упругие искажения решетки. Наклепанный металл меняет свои свойства тем сильнее, чем выше степень деформации.

Повторное деформирование микрообъемов материала способствует появлению трещин и отделению частиц материала. Циклически изменяющиеся контактные напряжения являются причиной появле-

ния поверхностных разрушений в виде ямок выкрашивания (питтинг), трещин, отслаивания, осповидного изнашивания. Возникновение микротрещин при данных напряжениях происходит также и при действии концентраторов напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений следует отнести дефекты в виде царапин, вмятин, рисок, пережогов, а к подповерхностным — микропоры, раковины, карбиды, неметаллические включения и т.д.

Снижение сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака объясняется действием эффекта Баушингера. При приложении знакопеременной нагрузки эффект Баушингера проявляется в искажении формы петли гистерезиса. Переход в пластическую область в каждом последующем полцикле осуществляется при меньшем напряжении, чем в предыдущем. Действие эффекта при перемене знака напряжения снижает предел упругости. Различную склонность к проявлению эффекта Баушингера имеют разные материалы: железо и сталь — значительную, алюминий — незначительную.

1.4. Адгезия твердых тел

Трение является следствием действия сил адгезии. Поверхностное явление, связанное с силами сцепления между атомами и молекулами поверхностей контактирующих тел, называется адгезией. Преодоление сил адгезии двух взаимоконтактирующих поверхностей тел происходит в момент начала их взаимного перемещения.

Взаимное перемещение элементов структуры какого-либо тела, вызывающее внутреннее трение, также связано с преодолением сил сцепления между атомами и молекулами структуры.

Если силы сцепления действуют внутри тела, то они вызывают когезию, если на поверхности — адгезию.

Любое воздействие, связанное с отрыванием элементов тел, встречает сопротивление сил когезии. Взаимное перемещение поверхностей твердых тел при их силовом взаимодействии связано с преодолением сил адгезии.

Чем больше площадь контакта реальных тел, тем прочнее адгезионное сцепление.

Ионы и молекулы поверхностных слоев взаимодействующих тел создают поле сил. Воздействие этого поля сил убывает с увеличением расстояния от поверхности. Этим объясняется то, что для проявления сил адгезии требуется сближение поверхностей.

При взаимном перемещении двух твердых тел сопротивление трения складывается из адгезионной F_a и когезионной F_k составляющих.

В зависимости от условий трения значения величин F_a и F_k могут увеличиваться, уменьшаться или быть равным нулю.

В связи с тем, что поверхности твердых тел покрыты различными пленками, которые также вступают в адгезионное взаимодействие, снижается проявление адгезии между конкретными телами.

Адгезионное взаимодействие совершенно чистых (ювенильных) поверхностей максимально (предельно) сближенных тел связано с их свойствами: структурой кристаллической решетки и др.

Адгезия зависит от силы межмолекулярного взаимодействия между твердыми телами.

Атомы и молекулы поверхностных слоев твердых тел находятся в неуравновешенном состоянии. Оно характеризуется значительной величиной поверхностной энергии, достигающей для металлов порядка 2000—4000 эрг/см². Это способствует активному взаимодействию поверхности твердых тел с атомами и молекулами окружающей среды (жидкости, газа или твердого тела).

Прочность адгезионного шва для чистых металлических поверхностей велика, так как силы металлических связей значительно перебивает ван-дер-ваальсовы.

Разрушение адгезионной связи происходит по месту ее образования (адгезионное разрушение) или на некоторой глубине (когезионное разрушение).

Процесс разрушения адгезионного шва связан со способностью материала наклепываться и может зависеть от способности образовывать в контакте твердые растворы, снижать температуру плавления и др.

Для образования адгезионной связи между поверхностями твердых тел необходимо привести их в соприкосновение в достаточных количествах точек. При этом поверхности твердых тел не должны иметь каких-либо пленок, загрязнений, т.к. схватывание будет происходить не между телами, а между пленками.

Однако определяющим в процессе схватывания все же является геометрический фактор (возникновение площади истинного контакта).

Под адгезией понимают слипание контактирующих поверхностей разных твердых или жидких тел.

Адгезионные связи между касающимися поверхностями возникают вследствие действия межповерхностных сил и молекулярного сцепления на поверхности раздела. Данные связи зависят от особен-

ностей электронного строения контактирующих тел, концентрации валентных электронов, плотности свободных электронов на поверхности раздела.

Энергия атомных связей, структура поверхности, распределение атомов в поверхностных слоях, дефекты кристаллической решетки определяют уровень адгезионного взаимодействия. Оно является причиной появления заедания, "холодной сварки", подповерхностного разрушения трущихся материалов, способствует росту интенсивности изнашивания и сил трения.

Сила адгезионного взаимодействия связана, прежде всего, с величиной суммарной площади фактического контакта, на которой проявляется действие поверхностных сил. На площадках фактического контакта трущихся тел происходит разрушение всех экранирующих слоев (загрязнений, смазки, оксидов, адсорбированных веществ). Этот процесс является следствием действия нормальных и тангенциальных усилий и деформаций.

Сила адгезионного взаимодействия зависит также и от влияния упругопластических контактных деформаций.

Деформация, износ трущихся приповерхностных слоев вызывает разрушение промежуточных слоев.

При сдвиге величина адгезионного износа непосредственно на поверхности раздела незначительна. Если адгезионное взаимодействие в месте контакта прочнее менее прочного материала, то осуществляется когезионное разрушение материала.

Адгезия металлов с объемно центрированной и гранцентрированной кристаллическими решетками выше, чем у металлов с гексагональной кристаллической решеткой.

Для приближенного определения величины объемного адгезионного износа V контактирующих тел при трении используют зависимость Арчарда

$$V \approx k \frac{Nl}{H}, \quad (1.1)$$

где k — коэффициент адгезионного износа; N — величина нормальной нагрузки; l — путь трения; H — твердость более легкого материала контактирующих тел.

Сближение атомов контактирующих поверхностей на расстояние межатомного взаимодействия, электронный обмен приводят к образованию узлов схватывания, возникновению прочных химических связей. Механические свойства узлов схватывания (мостиков сварки)

зависят от процессов рекристаллизации, диффузии, релаксации напряжений.

Адгезия наблюдается во многих узлах трения — в зубчатых передачах, опорах скольжения и качения, муфтах, при механической обработке металлов и др.

Единой теории адгезии пока не существует. В настоящее время используют несколько теорий, объясняющих адгезию: адсорбционную, электрическую, рекристаллизационную, энергетическую и др.

1.5. Адсорбция

Поглощение поверхностью какого-либо вещества, других веществ называется сорбцией.

Сорбция (от латинского "sorbeo" — поглощаю, втягиваю) — процесс поглощения одного вещества (сорбтива) другим (сорбентом) независимо от механизма поглощения.

Адсорбцией называют изменение концентрации вещества на границе раздела фаз.

Различают два вида адсорбции: физическую адсорбцию и активизированную или хемсорбцию.

При физической адсорбции молекулы газа связаны с атомами поверхности твердого тела слабыми ван-дер-ваальсовыми силами (дисперсионными, индукционными и ориентационными). Физическая адсорбция обратимый процесс. Физическая адсорбция протекает самопроизвольно.

Физическая адсорбция протекает при сравнительно слабых силах, удерживающих молекулы на поверхности твердого тела (энергия связи составляет $\sim 0,1$ эВ).

Хемсорбция обусловлена проявлением химических, валентных сил между адсорбированными молекулами и атомами поверхности твердых тел. Хемсорбция необратима и сопровождается большими тепловыми эффектами, достигающими до 400 кДж/моль и более. Способностью к хемсорбции обладают молекулы с высоким запасом энергии.

Химическая адсорбция сопровождается обменом электронами между адсорбирующей молекулой и адсорбентом, при этом энергия связи достигает величины ~ 1 эВ.

Физическая адсорбция характеризуется тепловыделением, а химическая адсорбция — теплопоглощением.

Адсорбция — необратимый процесс. Адсорбированные молекулы отрываются от поверхности и переходят в окружающую среду. На их место поступают новые молекулы. В результате устанавливается рав-

новесие, при котором в единицу времени поверхностью поглощается столько молекул, сколько покидает ее.

Процесс обратной адсорбции называется десорбцией.

Тело, на котором адсорбируются молекулы другого вещества, называется адсорбентом. Вещество, адсорбированное на теле, называется адсорбатом.

Адсорбция протекает на границе раздела фаз: твердое тело — газ, твердое тело — жидкость.

Если в поверхностном слое молекул одной составляющей больше, чем внутри фазы, то имеет место положительная адсорбция.

Молекулы адсорбата почти всегда покрывают поверхность тела, при этом толщина слоя адсорбата зависит от сил взаимодействия между поверхностью и окружающими ее молекулами.

Процесс адсорбции связан с уменьшением поверхностной энергии и выделением некоторой ее части в окружающую среду. Выделенную энергию в период протекания данного процесса называют энергией адсорбции.

Адсорбция — процесс изотермический. Интенсивность процесса адсорбции определяется объемом или массой адсорбированного вещества.

Объем адсорбированного вещества по Фрейдлиху оценивается выражением

$$V_a = k p^n, \quad (1.2)$$

где k , n — константы (k изменяется в зависимости от вида адсорбента и адсорбата; $n = 0.1 \dots 0.9$ — постоянная, зависящая от температуры); p — парциальное давление газа.

Вещества, склонные к адсорбции на поверхности раствора и к уменьшению поверхностного натяжения, называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). Связь между изменением поверхностного натяжения и адсорбцией ПАВ на поверхности описывается уравнением Гиббса

$$\Delta\pi = \frac{c}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc}, \quad (1.3)$$

где $\Delta\pi$ — изменение концентрации ПАВ в поверхностном слое; c — концентрация ПАВ в глубине раствора; σ — поверхностное натяжение; T — температура; R — газовая постоянная.

При контакте раствора с твердыми телами молекулы ПАВ даже при очень низкой концентрации имеют наибольшие шансы адсорбции на поверхности твердого тела.

Адсорбированные и хемсорбированные вещества существенно влияют на износ.

Внешний адсорбционный эффект способствует пластифицированию поверхностного слоя.

Внутренний адсорбционный эффект приводит к снижению поверхностной энергии, проявляющейся в возникновении хрупкости и потере прочности.

Данные эффекты являются причиной резкого перепада механических свойств по глубине, которая является необходимой для осуществления внешнего трения.

В зависимости от вида адсорбента и адсорбата существуют следующие теории адсорбции: мономолекулярная, многослойная мультимолекулярная, капиллярной конденсации и др.

1.6. Оксиды на металлах

Процесс трения усиливает процесс окисления. Физико-химические свойства поверхности металла, ее дефекты определяют механизм и глубину реакции поверхностного окисления. Определяющее значение при этом имеет чистота металла.

Пленка оксидов, в связи со своей высокой твердостью, защищает нижележащие слои металлов от механического воздействия. Однако, в виду незначительной толщины оксидных пленок, их защитные действия невелики.

Наличие оксидных пленок снижает молекулярно-адгезионное взаимодействие между трущимися поверхностями металлов.

Окисление связано с образованием оксида при протекании химической адсорбции атомов кислорода воздуха с металлической поверхностью. Затем происходит образование кристаллической фазы оксидов. Различия в постоянной кристаллической решетке оксида и металла способствуют тому, что пленки находятся в сжатом состоянии. Это состояние снижает дальнейшее проникновение кислорода к металлу.

Адсорбция кислорода на металле приводит к росту контактного потенциала, а также к изменению физических, механических и других свойств металла.

Дальнейшее протекание процессов окисления (рост пленки оксида) связано с выходом ионов металла на поверхность.

Это объясняется перемещением ионов электрическим полем, диффузией ионов по дефектам решетки, локальными перегревами.

Присутствие воды и находящихся в воздухе газов CO_2 и SO_4 создают условия для протекания электролитического окисления.

Оксиды подразделяют на две группы: MgO , BeO , TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , CdO , SnO , PbO_2 , Nb_2O_5 , Fe_2O_3 , ZnO_3 , Ta_2O_5 — полупроводники *n*-типа; Cr_2O_5 , NiO , Cu_2O , Ag_2O , FeO — полупроводники *p*-типа.

Механизм роста оксидных пленок первого типа связан с диффузией электронов и катионов, второго типа — дрейфом вакансий.

Фрикционные характеристики пленок оксидов связаны с природой оксидов.

Например, оксид Fe_2O_3 выполняет роль абразива, оксиды Fe_3O_4 и FeO обеспечивают большую износостойкость.

Защитная роль пленки оксида связана с твердостью оксида и основного металла.

Максимальная несущая способность оксидной пленки связана с твердостью основного металла. Чем меньше разница между твердостью основного металла и оксида, тем выше прочность пленки.

В начале процесса окисления пленки обладают большой прочностью и защищают материал от схватывания. Дальнейший рост толщины пленки приводит к уменьшению ее прочности и вследствие действия сил трения она легко отделяется. Оксидные пленки покрываются адсорбционными газами.

Основное назначение оксидных пленок — предотвращение образования металлических связей и замена их межмолекулярными вандер-ваальсовыми.

На поликристаллических поверхностях свойства оксидных пленок различны. Оксидные пленки на трущихся поверхностях приводят к ослаблению схватывания, уменьшению трения и износа. Структура, состав, защитные свойства их зависят от температуры, контактного давления, временного фактора. Соотношение скоростей разрушения и восстановления оксидных пленок влияет на интенсивность и механизм поверхностного разрушения. Высокие скорости разрушения оксидных слоев способствуют образованию физически чистых (ювенильных) поверхностей, имеющих повышенную склонность к схватыванию.

Образование и разрушение вторичных структур сопровождается деформированием и активацией поверхностных слоев.

Глава 2 МАКРО И МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

При изучении механики триботехнического взаимодействия элементов подвижных сопряжений машин и механизмов определяющее значение имеют геометрические характеристики трущихся тел.

Поверхности деталей машин образуются в основном при механической обработке. В результате наличия дефектов в системе станок—приспособление—инструмент—деталь (СПИД), невозможно получить идеальный геометрически правильный профиль поверхности, в точности соответствующий номинальному, т.е. определяемому чертежом. Поэтому любая деталь имеет отклонения от номинального профиля.

Отклонения, связанные с процессом обработки, называются технологическими или исходными, а с неравномерным износом различных участков поверхностей — эксплуатационными.

Опыт исследования и разработки соответствующего аппаратного обеспечения показывает, что методически целесообразно подразделять неровности на четыре размерных уровня: макроотклонения или отклонения формы, волнистость, шероховатость и субшероховатость. Они имеют характерные размеры макро-, микро и субмикроскопического порядка. Условно области существования каждого из этих уровней можно представить в виде некоторых подмножеств в пространстве шаговых и высотных параметров (рис. 2.1).

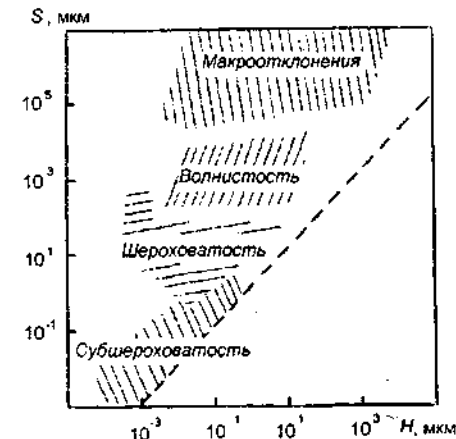


Рис. 2.1. Соотношение характерных размеров отклонений топографии

2.1. Макроотклонения поверхности деталей

Макроотклонения характеризуются нерегулярными отклонениями поверхности детали от номинального профиля, имеющие большой шаг ($S_m = 1 \dots 5000$ мм) и сравнительно малую высоту ($H_m = 1 \dots 50$ мкм). Как правило, $H_m/S_m \leq 0,001$. Макроотклонения представляют собой единичные регулярно не повторяющиеся неровности поверхности. Согласно ГОСТ 24642—81 и ГОСТ 25069-81 макроотклонения классифицируют по форме, расположению, форме и расположению. Макроотклонения зависят от качества изготовленных деталей. Основным показателем любого макроотклонения служит его максимальная величина Δ . Виды отклонений формы, расположения и их сочетания для поверхностей деталей, предусмотрены ГОСТом 2462—81.

Оценка макроотклонений поверхности осуществляется универсальными и специальными измерительными приборами.

Отклонения от прямолинейности и плоскостности при контроле точности формы поверхности измеряют индикаторами и индикаторными приспособлениями, поверочными угольниками и плитами, различными типами лекальных, поверочных и оптических линеек.

Отклонения от круглости оценивают двух и трехконтактными приборами или кругломерами. При двухконтактном контроле овальности, круглости и огранки с четным числом граней используют рычажные скобы, представляющие собой специальные держатели 1 с закрепленными измерительными наконечниками или измерительными головками (индикаторы) 2 (рис. 2.2, а). Контроль огранки с нечетным числом граней производится трехконтактным способом в измерительной призме 1 с индикатором 2 (рис. 2.2, б) или в калиброванных кольцах.

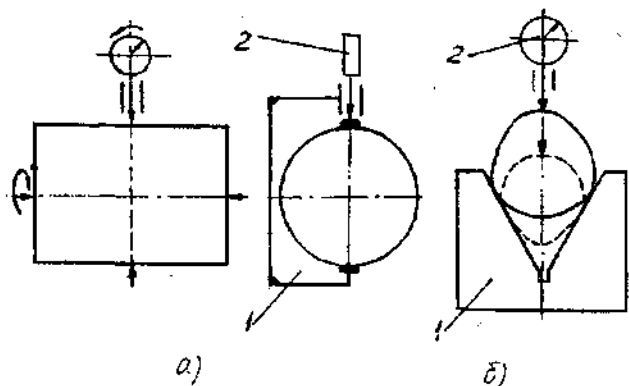


Рис. 2.2. Схемы контроля отклонений от а) круглости и б) огранки

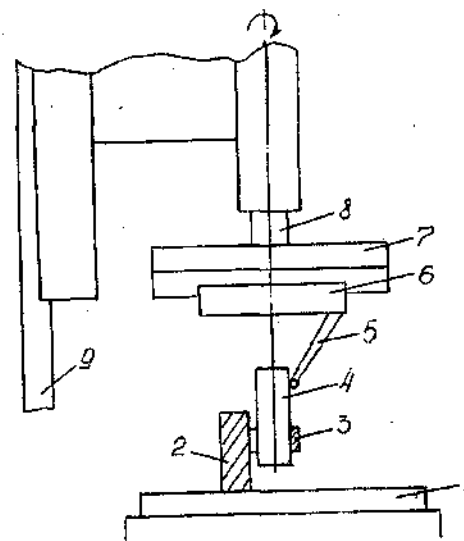


Рис. 2.3. Схема измерения некруглости (метод образцового вращения)

Полное и точное определение величины отклонения от круглости получают на специальных приборах — кругломерах. По принципу работы кругломеры могут быть электромеханическими, индуктивными и пневматическими. Кругломеры выпускают двух типов: КН — с вращающимся измерительным наконечником; КД — с вращающимся изделием (деталью). На рис. 2.3 дана схема кругломера первого типа. Измеряемая деталь 4 закрепляется на призме 2 прихватом 3. При помощи крестового стола 1 ось детали совмещается с осью шпинделя 8, на котором закреплены направляющие 7 индукционного преобразователя 6. При вращении шпинделя деталь непрерывно ощупывается по окружности наконечником 5. Перемещение шпинделя по направляющим 9 дает возможность производить контроль непрямолинейности наружных или внутренних образующих измеряемых деталей.

Общий вид кругломера типа КД представлен на рис. 2.4.

Сигналы измерительной головки, предварительно усиленные в $10^3 \dots 10^4$ раза и записанные в полярных координатах, представляют собой круглограмму, сравнение которой с прилегающей окружностью позволяет оценить отклонение проверяемой детали от круглости. Прилегающая окружность может быть проведена с помощью циркуля или шаблона — прозрачной пластины с нанесенными на ней концентрическими окружностями. Шаблон накладывают на круглограмму и перемещают до тех пор, пока одна из окружностей шаблона не займет

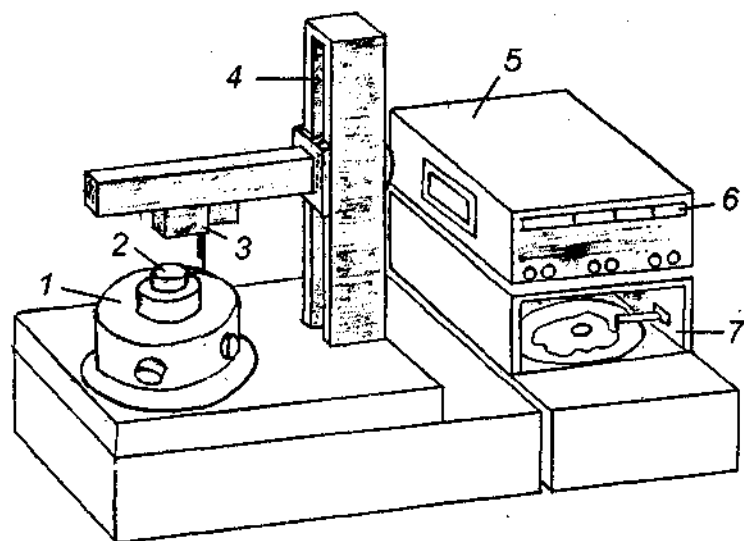


Рис. 2.4. Кругломер типа КД: 1 — предметный стол; 2 — измеряемая деталь; 3 — преобразователь индуктивный; 4 — стойка с кронштейном и кареткой; 5 — электронный блок; 6 — окна цифровой индикации; 7 — записывающий прибор

положение прилегающей. Тогда наибольшее расстояние от контура круглограммы до прилегающей окружности будет характеризовать отклонение исследуемой детали от круглости.

Кругломеры образцового вращения созданы на базе индуктивных электромеханических профилографов для записи диаграмм неровностей в поперечных сечениях круглых деталей в полярных координатах (т.е. круглограмм) с увеличением примерно до $\times 10000$. В электрических схемах кругломеров предусмотрены частотные фильтры. Биение шпинделей этих приборов не превышает $0,05...0,07$ мм.

В промышленности применяют кругломеры моделей 255, 256, 258, 289, 290 — с унифицированной электронной системой типа КД, 298 — с унифицированной электронной системой и полуавтоматическим центрированием типа КД, 299 — автоматизированный с использованием информационно-вычислительного блока на базе микроЭВМ. Используют также и накладные кругломеры: а) для измерения наружных поверхностей — мод. 16000, 16100, 16200; б) для измерения отверстий — мод. ВЕ-37.

Конусность, бочкообразность, седлообразность определяются различными измерительными средствами: индикаторами, микрометрами, измерительными скобами типа СИ по ГОСТ 11098—75 и др.

2.2. Волнистость поверхности

Волнистость занимает промежуточное положение между шероховатостью и отклонениями геометрической формы по величине шага.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность квазипериодических, примерно равных по размерам, выступов и впадин, расстояние между которыми — шаг волн S_B , превышает их высоту H_B . Обычно $S_B/H_B \geq 40...1000$.

Волнистость определяют на перпендикулярном сечении поверхности исключением (фильтрацией) шероховатости и отклонения формы поверхности. Волнистость позволяет оценить отклонение линии, огибающей профиль от его формы.

Анализ волнограмм убедительно иллюстрирует, что форма волн на поверхности детали не соответствует правильной геометрической форме и в условном приближении может быть описана синусоидой. В зависимости от вида обработки S_B лежит в пределах $0,25...10$ мм, а H_B $0,01...500$ мкм.

Использование понятия волнистости необходимо для выделения из всего профиля поверхности рабочей части, т.к. неровности, находящиеся во впадинах волн, не участвуют в образовании площади контакта и образуют нерабочую часть профиля. Кроме того, волнистость существенно влияет на свойства стыка деталей.

В настоящее время параметры волнистости не стандартизированы. Согласно ГОСТ 24642—81 волнистость включают в отклонения формы, что вызывает определенные трудности, поэтому в качестве дополнительных находят значение S_B , H_B и r_B .

При определении наибольшей высоты волн H_B требуется получить не менее пяти волнограмм с различных участков исследуемой поверхности. Базовая длина каждой волнограммы должна соответствовать сумме длин не менее пяти волн. Для каждой волнограммы строят среднюю линию. Построение средней линии волнограммы аналогично нахождению средней линии профилограммы. Затем параллельно средней линии проводят линии через самую высокую вершину и самую низкую впадину волн. Первая является линией выступов, вторая — линией впадин. Величину H_B определяют как средние арифметические для всех участков.

Величина среднего шага волн S_B находится как среднее арифметическое расстояние между вершинами волн в пределах базовой длины l_B , при $l_B \geq S_B$. Шаг волны определяется непосредственно по волнограмме измеряемой поверхности.

Средний радиус кривизны вершин волн — r_b рассчитывается по методике определения среднего радиуса кривизны вершин выступов шероховатости. При определении r_b используют радиус, определенный относительно средней линии.

Волнистость определяется качественными и количественными методами, контактными и бесконтактными приборами. При качественной оценке определяют шаг волны и число волн, приходящихся на длину окружности. Ее можно производить визуально осмотром, проверкой на краску, получением оттиска на бумаге, прокручивание детали проволокой и другими способами. Количественно волнистость измеряется волнографами и волномерами. Волнистость можно оценивать и контактными приборами определения шероховатости и приборами контроля отклонения формы, в частности кругломерами.

При определении волнистости профилографами они оборудуются специальными приспособлениями и специальными приборами для ее регистрации. Приспособления имеют образцовую поверхность сравнения, по отношению которой записывается профиль. При этом иглы малого радиуса заменяют специальной сферической опорой, радиус которой составляет несколько миллиметров.

Применение кругломеров дает возможность оценивать волнистость поверхностей вращения. При этом осуществляется запись волнограмм на электротермической бумаге в виде диаграммного диска диаметром 178 мм, шириной зоны записи 28—50 мм. Часть кругломеров оборудованы приспособлениями для записи профилограмм в прямоугольной системе координат. Это позволяет контролировать волнистость плоскостей и прямолинейных образующих.

Специальные приборы волнографы позволяют осуществлять запись волнограмм. Особенность конструкции волнографов связана с наличием устройств для фильтрации шероховатости и отклонений формы поверхности.

2.3. Шероховатость поверхности

Шероховатость представляет собой совокупность микронеровностей, расположенных на волнистой поверхности тела.

Роль шероховатости особенно важна в подвижных соединениях деталей машин, т.к. она оказывает значительное влияние на величину трения и износа трущихся поверхностей подшипника, направляющих, ползунов и т.д.

Под шероховатостью поверхности принято понимать последовательность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф рассматриваемой поверхности и взятых в пределах участ-

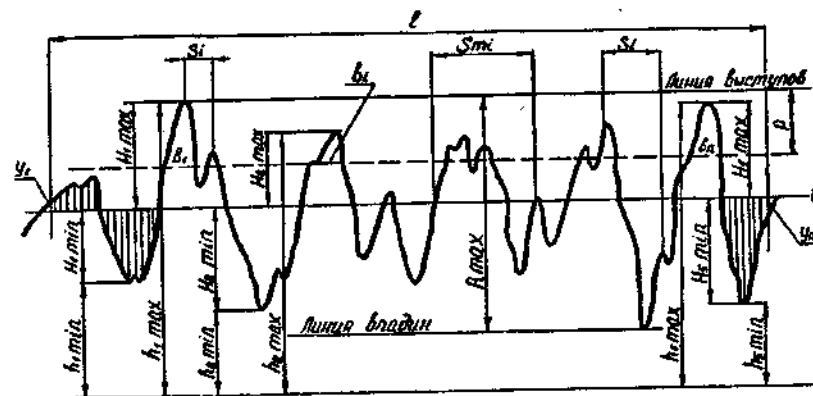


Рис. 2.5. Действительный профиль (профилограмма) поверхности

ка, длина которого соответствует некоторой базовой длине l . Шаг микронеровностей шероховатости составляет 2...800 мкм, а высота — 0,03...400 мкм. Базовую длину l , величина которой стандартизована, выбирают таким образом, чтобы на ней не проявлялись другие виды неровностей.

Шероховатость позволяет оценить отклонение действительного профиля от линии, его огибающей.

Шероховатость обработанной поверхности является следствием пластической деформации поверхностного слоя детали при образовании стружки, копирования, неровностей режущих кромок инструмента, трения его о деталь и другими причинами.

Основной задачей при исследовании шероховатости поверхности является определение ее параметров.

При оценке микрогеометрии поверхности детали используют ее профиль, который получается сечением поверхности плоскостью, перпендикулярной к этой поверхности и соориентированный в определенном направлении. Графическое изображение профиля поверхности называется профилограммой. Профилограмму, снятую в направлении, перпендикулярном к следам обработки, называют поперечной, а в направлении следов обработки — продольной.

На рис. 2.5 схематично показана профилограмма поверхности твердого тела. При проведении линии, огибающей действительный профиль, хорошо иллюстрируется различие между отклонением формы и микрорельефом поверхности.

При оценке исследуемой поверхности с помощью профилограмм следует помнить, что профиль поверхности представлен пилообразной формой потому, что это является результатом использования приборов, у которых вертикальное увеличение во много раз больше горизонтального (например, 200000 и 4000, соответственно). Реальный профиль поверхности выглядит несколько иначе.

Согласно ГОСТ 2789—73 нормирование шероховатости поверхности основано на системе М.

При определении числовых значений шероховатости по системе М отсчет производят от единой базы, за которую принята средняя линия (рис. 2.5).

Средней линией профиля m называется базовая линия, имеющая форму номинального профиля поверхности и делящая действительный (измеренный) профиль так, что в пределах базовой длины l среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

Удобно положение средней линии определять методом средних. При этом ниже самой глубокой впадины профилограммы проводят горизонтальную линию. По данной линии через каждые 2 мм измеряют ординаты профиля y_i . Полученные значения ординат разделяют на 2 равные группы, соответствующие первой и второй половинам волнограмм. Среднюю линию проводят через две точки с координатами x_{m1} ;

y_{m1} и x_{m2} , y_{m2} .

$$x_{m1} = \frac{x_1 + x_{n/2}}{2}, \quad x_{m2} = \frac{x_{n/2} + x_n}{2}; \quad (2.1)$$

$$y_{m1} = \frac{1}{n/2} \sum_{i=1}^{n/2} y_i, \quad y_{m2} = \frac{1}{n/2} \sum_{i=n/2+1}^n y_i \quad (2.2)$$

Базовой длиной l называется длина участка поверхности, выбираемого для измерения шероховатости без учета других видов неровностей (например, волнистости), имеющих шаг более l .

Числовые значения базовой длины выбирают из ряда: 0,01; 0,003; 0,008; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм.

Характеристики шероховатости профиля определяются по отношению к средней линии.

Количественно шероховатость поверхности (независимо от способа ее получения) по системе М оценивают: средним арифметиче-

ским отклонением профиля — R_a ; средним квадратическим отклонением — R_q ; высотой неровностей профиля по десяти точкам — R_z ; наибольшей высотой неровностей профиля — R_{max} ; средним шагом неровностей — S_m ; средним шагом неровностей по вершинам — S ; относительной опорной длиной профиля — t_p , где p — значение уровня сечения профиля.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a — среднее арифметическое из абсолютных значений отклонения профиля y_i в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i). \quad (2.3)$$

Под отклонением профиля y_i понимается расстояние между i -ой точкой профиля и средней линией, измеренное по нормали, проведенной через данную точку профиля к средней линии.

Среднее квадратическое отклонение профиля R_q — корень квадратный из среднего значения квадратов отклонения профиля в пределах базовой длины:

$$R_q = \left(\frac{1}{l} \int_0^l y(x)^2 dx \right)^{1/2} \approx \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^{1/2}. \quad (2.4)$$

Числовые значения R_q в стандарте не приводятся.

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z — среднее значение абсолютных высот пяти наивысших выступов $H_{i \max}$ и глубин пяти наибольших впадин $H_{i \min}$ профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\left| \sum_{i=1}^5 H_{i \max} \right| + \left| \sum_{i=1}^5 H_{i \min} \right|}{5}. \quad (2.5)$$

Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} — расстояние между наивысшей точкой выступов и наинизшей точкой впадин профиля в пределах базовой длины.

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

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}, \quad (2.6)$$

где S_{m_i} — шаг неровностей, под которым понимается длина отрезка средней линии, ограниченного точками пересечения этой линии одноименных сторон соседних неровностей, n — число шагов в пределах базовой длины.

Средний шаг неровностей по вершинам S — среднее значение расстояния между вершинами характерных неровностей в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.7)$$

Относительная опорная длина профиля t_p — отношение длины профиля к базовой длине:

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i, \quad (2.8)$$

где b_i — длина профиля; p — уровень сечения профиля, т.е. расстояние между линией выступов профиля и линией пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля.

В трибологии широко используется также опорная кривая профиля поверхности t_p . Кривая t_p дает возможность оценивать распределение вершин микронеровностей по высоте, т.е. материала в шероховатом слое. Кроме того, она характеризует изменение (возрастание) площади взаимодействия по мере сближения контактирующих тел и зависимость длины опорной линии от расстояния сближения.

При построении кривой t_p (рис. 2.6), профилограмму исследуемой поверхности последовательно разбивают на горизонтальные уровни (уровни износа), параллельные средней линии.

Горизонтальные уровни можно представить как абсолютно жесткие плоскости, контактирующие с исследуемой шероховатой поверхностью. При этом относительная опорная длина профиля t_p будет

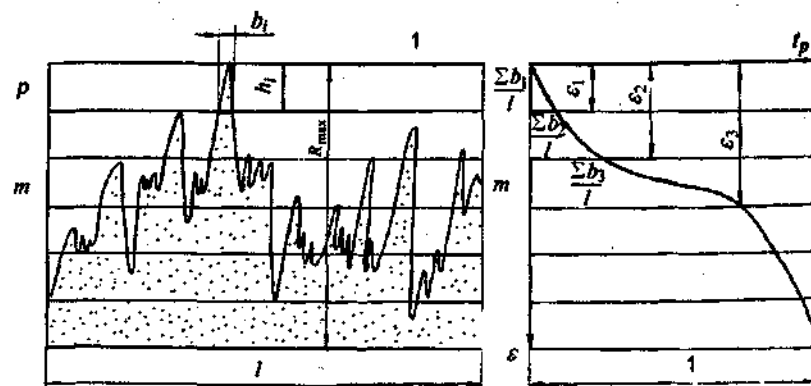


Рис. 2.6. Последовательность построения опорной кривой по профилограмме исследуемой поверхности

увеличиваться от 0 до 1 — при полной деформации микронеровностей.

Опорная кривая профиля поверхности строится рядом с профилограммой в координатах $\epsilon - t_p$. По оси абсцисс откладывают величину t_p , которая представляет собой отношение суммы длин сечений выступов на i -том уровне $\sum b_i$ к базовой длине l :

$$t_p = \frac{\sum b_i}{l}. \quad (2.9)$$

По оси ординат откладывается соответствующее величине t_p значение относительного сближения ϵ , которое равно отношению высоты i -го уровня h_i к максимальной высоте профиля R_{max} :

$$\epsilon = \frac{h_i}{R_{max}}. \quad (2.10)$$

Относительная опорная длина профиля t_p принимается из ряда: 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90%.

В виду того, что при взаимодействии поверхностей деталей машин в контакте участвуют только вершины выступов, составляющие верхнюю часть опорной кривой, практический интерес представляет использование ее начальной части.

Начальный участок опорной кривой профиля поверхности с большой степенью точности аппроксимируется параболической зависимостью:

$$t_p = b \varepsilon^\nu, \quad (2.11)$$

где b и ν — параметры, зависящие от вида обработки. Обычно $\nu = 1, 6 \dots 3$, $b = 1 \dots 10$.

Для получения более достоверного изображения опорной кривой рекомендуется использовать значения не менее пяти профилограмм, снятых с различных участков поверхности детали под углом 45° к направлению движения инструмента при обработке.

Относительная опорная длина профиля в некотором приближении соответствует фактической площади касания, которая равна сумме площадей вершин микронеровностей, попавших в сечение профиля. С учетом ранее рассматриваемой волнистости в расчетных методах оценки трибологических характеристик используют понятие контурной площади контакта, равной совокупности площадей, где группируются фактические пятна контакта. Если принять номинальную (геометрическую) площадь контакта, равной полной площади контакта поверхности детали за 100%, то контурная площадь для реальных поверхностей составляет от 5 до 15%, а фактическая площадь от 0,01 до 0,1%. Величина контурной и фактической площадей контакта рассчитывается в контактных задачах теории упругости и пластичности, учитывающих физико-механические свойства и параметры микрогеометрии поверхностей.

Применительно к задачам трения и износа достаточной информативностью обладает безразмерный комплекс Δ :

$$\Delta = R_{\max} / r b^{1/\nu}. \quad (2.12)$$

Величины, входящие в данный комплекс, определяются по снятым профилограммам.

Геометрический смысл комплекса Δ заключается в том, что он определяет наклон прямой зависимости относительно сближения от величины опорной кривой t_p .

Анализ выражения (2.12) позволяет сделать вывод, что безразмерный комплекс Δ наиболее полно отражает эксплуатационные свойства шероховатой поверхности.

Классы шероховатости поверхности определяются по числовым значениям параметров R_a и R_z (табл. 2.1).

При расчетах на трение и износ, помимо шести стандартных параметров, характеризующих шероховатость поверхности (трех высотных — R_a , R_z и R_{\max} , двух шаговых — S и S_m , и относительной опорной длины профиля t_p), приходится использовать ряд дополнительных (нестандартных) геометрических параметров. Это объясняется тем, что перечисленные характеристики недостаточно полно оценивают микрогеометрию поверхности. Так, например, при одной и той же величине R_q распределение неровностей по высоте, их формы будут различными, что обуславливает и различные эксплуатационные качества сопрягаемых поверхностей.

Дополнительные характеристики микрогеометрии поверхности приведены в табл. 2.2.

При определении нестандартных характеристик шероховатости — взаимодействия деталей машин снимают профилограммы с нескольких (не менее пяти) участков исследуемой поверхности. Длина

Таблица 2.2. Дополнительные (стандартные) параметры волнистости и шероховатости поверхности

Термин	Условное обозначение	Определение
Волнистость		
Наибольшая высота волн	H_w	Расстояние между линиями выступов и впадин волн в пределах базовой длины волнограммы l_w
Средний шаг волн	S_w	среднее арифметическое расстояние между вершинами волн в пределах базовой длины l_w , при $l_w \geq 5S_w$
Средний радиус кривизны вершины волн	r_w	Среднее значение радиуса кривизны волн в пределах l_w
Шероховатость		
Наибольшая высота выступа (глубина сглаживания)	R_p	Расстояние между линией выступов и средней линией
Средний радиус кривизны вершин выступов	r	Среднее значение кривизны выступов вершин, найденное для пяти наиболее высоких выступов в пределах l
Средний угол наклона неровностей профиля	φ	Средний угол наклона боковых сторон неровностей профиля к средней линии в пределах l

Таблица 2.1. Классы шероховатости

Классы шероховатости поверхности	Разряды	Параметры шероховатости, мкм		Базовая длина l , мм	
		R_a	R_z		
1	—	От 80 до 10	От 320 до 160	8,0	
2	—	От 40 до 20	От 160 до 80		
3	—	От 20 до 10	От 80 до 40		
4	—	От 10 до 5,0	От 40 до 20	2,5	
5	—	От 5,0 до 2,5	От 20 до 10		
6	а	От 2,5 до 2,0	От 10 до 8,0	0,8	
	б	От 2,0 до 1,6	От 8,0		
	в	От 1,6 до 1,25	до 6,3		
7	а	От 1,25 до 1,00	От 6,3 до 5,0		
	б	От 1,00 до 0,80	От 5,0 до 4,0		
	в	От 0,80 до 0,63	От 4,0 до 3,2		
8	а	От 0,63 до 0,50	От 3,2 до 2,5		
	б	От 0,50 до 0,40	От 2,5 до 2,0		
	в	От 0,40 до 0,32	От 2,0 до 1,60		
9	а	От 0,32 до 0,25	От 1,60 до 1,25	0,25	
	б	От 0,25 до 0,20	От 1,25 до 1,00		
	в	От 0,20 до 0,16	От 1,00 до 0,80		
10	а	От 0,160 до 0,125	От 0,80 до 0,69		
	б	От 0,125 до 0,100	От 0,69 до 0,50		
	в	От 0,100 до 0,080	От 0,50 до 0,40		
11	а	От 0,080 до 0,063	От 0,40 до 0,32		
	б	От 0,063 до 0,050	От 0,32 до 0,25		
	в	От 0,050 до 0,040	От 0,25 до 0,20		
12	а	От 0,040 до 0,032	От 0,20 до 0,16		
	б	От 0,032 до 0,025	От 0,16 до 0,125		
	в	От 0,025 до 0,020	От 0,125 до 0,100		
13	а	От 0,020 до 0,016	От 0,100 до 0,080		0,08
	б	От 0,016 до 0,012	От 0,080 до 0,063		
	в	От 0,012 до 0,010	От 0,063 до 0,050		
14	а	От 0,010 до 0,008	От 0,050 до 0,040		
	б	—	От 0,040 до 0,032		
	в	—	От 0,032 до 0,025		

каждого из участков должна быть базовой, а сами участки — характерны для данной поверхности. Затем методом средних устанавливают среднюю линию и проводят линии выступов и впадин.

Глубина сглаживания (наибольшая высота выступов) R_p находится как расстояние от линии выступов до средней линии. Для расчетов используют среднее значение R_p для пяти профилограмм:

$$R_p = \sum_{i=1}^5 R_{pi} \quad (2.13)$$

Для определения среднего радиуса кривизны вершин выступов r необходимо снять профилограммы в поперечном и продольном направлениях.

На каждой профилограмме назначают не менее пяти высоких выступов и определяют ширину их сечения b_i на расстоянии $0,3R_a$ или $0,06R_{max}$ от вершины. Величина среднего радиуса для каждой из профилограмм находится из выражения:

$$r_i = \frac{\gamma_b b_i}{\gamma_r 8h_i} \quad (2.14)$$

где γ_r, γ_b — величина горизонтального и вертикального увеличений.

Расчетный радиус кривизны вершины выступов изучаемой поверхности определяется по формуле:

$$r = (r_n r_{пр})^{1/2} \quad (2.15)$$

где $r_n, r_{пр}$ — среднее значение радиусов кривизны выступов, рассчитанных для поперечной и продольной профилограмм.

Средний угол наклона неровностей профиля φ находится как средний угол наклона боковых сторон неровностей профиля к средней линии в пределах l .

Угол наклона элемента профиля определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{\gamma_r y_i}{\gamma_b x_i} \quad (2.16)$$

где x_i и y_i — катеты треугольника; вертикальный катет откладывается от точки выступа, удаленной от вершины на $0,3R_a$ ($0,06R_{\max}$), горизонтальный катет проводится параллельно средней линии из точки впадины, лежащей на расстоянии $0,3R_a$ ($0,06R_{\max}$) от ее вершины.

При расчетах используют среднее значение тангенса угла наклона неровностей профиля, определяемое из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{n} \sum_i^n \operatorname{tg} \varphi_i. \quad (2.17)$$

Параметры опорной кривой b и r — параметры степенной аппроксимации начальной части кривой рассчитываются по формулам:

$$v = 2\eta_p \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b = \eta_p \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^v, \quad (2.18)$$

где η_p — средняя относительная опорная длина профиля, взятая по средней линии для пяти профилограмм:

$$\eta_p = \frac{1}{5} \sum_i^5 \eta_{pi}. \quad (2.19)$$

Контроль микрорельефа поверхности принято производить тремя методами: визуальным — сравнением обрабатываемых поверхностей с образцами шероховатости поверхности или деталями с аттестованной шероховатостью (органолептический контроль); контактным — применением специальных осязающих приборов и бесконтактным использованием различных оптических приборов. Первый метод позволяет оценивать состояние микрогеометрии качественно, а два других — количественно.

Классификация методов контроля шероховатости представлена на рис. 2.7.

Качественно шероховатость поверхности контролируют путем сравнения с образцами шероховатости. Образцы представляют собой бруски размером 20×30 мм. Набор образцов, укомплектованных по видам обработки (точение, строгание, фрезерование, шлифование) и материалам, из которых они изготовлены, устанавливают в специальных оправках (рис. 2.8). Сравнение осуществляют визуально. Оно позволяет оценить шероховатость порядка от $R_a = 40 \dots 20$ мкм до



Рис. 2.7. Классификация методов контроля шероховатости

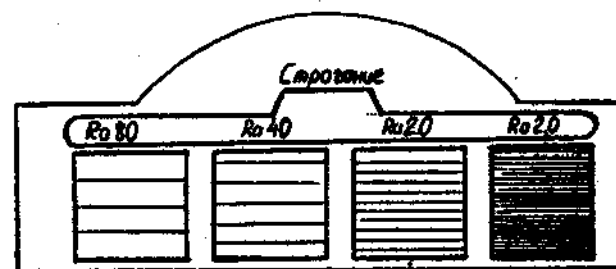


Рис. 2.8. Набор образцов шероховатости поверхности

$R_a = 1,25 \dots 0,63$ мкм. Для повышения точности используют щупы и микроскопы сравнения, например, типа МС-48.

В связи с тем, что профиль содержит информацию о всей поверхности, поэтому контроль и измерение характеристик микрогеометрии поверхности производится приборами, оценивающими тем или иным методом изучаемый профиль.

Широкое использование для определения параметров шероховатости получили приборы щупового типа. Они подразделяются на профилометры, профилографы и профилометры-профилографы.

Метод теневой проекции состоит в том, что к исследуемой поверхности под углом 60° прижимается острое лезвие. Оно подсвечивается с одной стороны таким образом, чтобы на поверхность падала его тень, которая воспроизводит неровности профиля. Профиль оценивается с помощью микроскопа, имеющего отсчетное устройство. Этот метод применяется для измерения шероховатости весьма грубо обработанных поверхностей.

Интерференционный метод определения параметров шероховатости связан с тем, что поток монохроматического света разделяется на две части полупрозрачным зеркалом. Одна часть света попадает на зеркало и отражается, вторая часть падает на изучаемую поверхность и также отражается. Отраженные пучки света складываются и дают картину интерференции. Картина интерференции наблюдается в виде чередующихся светлых и темных полос. Отраженный от вершин неровностей свет проходит меньший путь, чем свет, отраженный от впадин. Поэтому наличие неровностей изменяет картину интерференции, вызывая искажение (изгиб) полос. Определяя отношение искажения к ширине интервала полос, производят расчет высот неровностей.

Для измерения шероховатости поверхности 10—14-го классов используют микроинтерферометры МИИ-4, МИИ-5, МИИ-9, МИИ-11, МИИ-12.

Измерение шероховатости внутренних и труднодоступных поверхностей применяют иммерсионно-репликовый интерферометр МИИ-10. На данном приборе рассматривается не сама поверхность, а ее отпечаток (реплика).

Для получения характеристик микрогеометрии используют также и растровые микроскопы типа ОРМ-1.

Основной недостаток оптических приборов — относительно большая трудоемкость измерения. Этого недостатка лишены методы измерения параметров шероховатости при помощи лазера. Наиболее точным и удобным из лазерных методов измерения является метод сдвига частоты измерения.

2.4. Субшероховатость

Субшероховатость, характеризующая тонкую структуру реальной поверхности нанометрического масштаба, выявлена на поверхности микронеровностей. По мнению Б.И. Костецкого характеристики субмикроскопического рельефа являются теми факторами, без которых невозможно достаточно объективное понимание процессов трения, износа и смазки.

Возникновение субшероховатости тесно связано с внутренним строением твердых тел и его несовершенством, напряженно-деформированным состоянием тонких поверхностных слоев и влиянием рабочей среды в зоне контакта. Косвенным доказательством субшероховатости являются эксперименты по оценке полной площади реальной поверхности по количеству адсорбированных веществ.

Исследование неровностей нанометрического масштаба производится в настоящее время с помощью сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии. Так, например, сектором зондового анализа поверхности, ИММС АНБ (г. Гомель) разработан экспериментально-вычислительный комплекс "НАНОТОП-2", который включает:

- сканирующий туннельный микроскоп МИРАТ-2м;
- атомно-силовой микроскоп;
- электронный блок управления;
- компьютер IBM PC/AT 386 DX для управления сканированием;
- компьютер IBM PC/AT 386 DX для обработки и анализа изображений;
- методики исследования поверхности;
- программные средства по визуализации, обработке изображений и моделированию контакта.

Принцип работы туннельного микроскопа состоит в том, что при перемещении металлической иглы, закрепленной в трехкоординатном пьезоприводе, над исследуемой поверхностью под действием напряжения U между образцом и иглой возникает туннельный ток I_T , равный:

$$I_T = U \exp(-A\Phi^{1/2}d), \quad (2.20)$$

где Φ — величина потенциального барьера в зазоре игла-поверхность, d — зазор между иглой и поверхностью, A — коэффициент пропорциональности ($A = 1$, если Φ измеряется в электрон вольтах).

В атомно-силовом микроскопе за контрольную характеристику (на поддержании постоянства которой функционирует система обратной связи прибора) принимается градиент сил притяжения ван-дер-ваальсовой природы, возникающих между острием зонда и исследуемой поверхностью при их достаточном сближении. В качестве сканирующего зонда обычно применяется "Г"-образная балка, консольно закрепленная более длинным концом и содержащая острие с радиусом $\sim 0,1$ мкм на другом конце. Зонд изготавливался из проволоки вольфрама диаметром 100 мкм путем заточки электрохимическим травлением с последующим электрохимическим полированием. Защемлен-

ный конец зонда приводится в колебания с собственной частотой 30—100 КГц с помощью пьезоэлемента. При подводе острия зонда к образцу до расстояния, на котором “чувствуются” поверхностные силы притяжения, амплитуда колебаний испытывает изменения. Эти изменения регистрируются с помощью оптического датчика как разность опорного и отраженного светового сигнала, проходящего от лазерного источника через оптическое волокно, подведенное к “пятке” зонда на расстояние ~10 мкм. Сигнал с оптического интерферометра преобразуется в электрический и далее с помощью блока электронной связи поддерживается на постоянном уровне, т.е. величина амплитуды колебаний зонда путем его приближения (удаления) к исследуемой поверхности образца в процессе сканирования остается постоянной.

Основные различия в применении СТМ и АСМ методов заключаются в возможности исследования в первом случае лишь электропроводящих образцов, во втором - произвольных твердых тел с достаточно гладкой поверхностью, в том числе и диэлектриков.

Глава 3 ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕНИЯ

3.1. Внутреннее и внешнее трение

Построение механизмов и их работоспособность находится в непосредственной связи с потерями на трение. В широком смысле трение рассматривается как процесс сопротивления относительному перемещению тел. Это сопротивление в простейшем случае определяется деформацией среды и работой, которая необходима для перемещения движущегося тела.

В более узком смысле различают внутреннее и внешнее трение. Под внутренним трением понимается сопротивление деформированию обтекающей среды во всем объеме возмущения, под внешним — контактным трением — касательное сопротивление сдвигу, возникающее на контактной поверхности тел.

В случае трения твердых тел, соприкасающихся по плоскости, сила трения возникает в плоскости их касания и направлена противоположно относительному перемещению (рис 3.1).

Возникая на контактной поверхности, внешнее трение оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние тел, как правило, интенсифицируя деформацию. Таким образом, проявляется связь внешнего трения и напряженно-деформированного состояния тел контактирующей пары, трения внешнего и внутреннего.

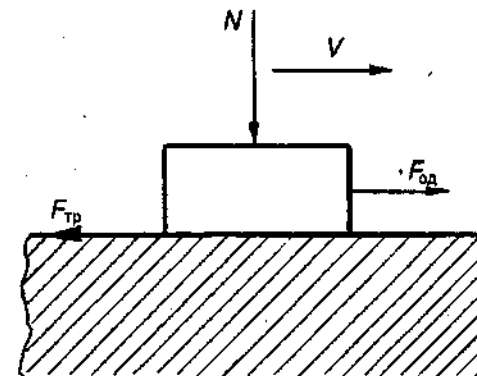


Рис. 3.1. Схема действия сил при внешнем трении:
 N — нормальная нагрузка, V — скорость скольжения, $F_{ад}$ — сдвигающая сила, $F_{тр}$ — сила трения

Внутренне трение — это явление сопротивления перемещению частиц одного и того же тела при его деформировании. В твердых телах внутреннее трение является их свойством, основанным на необратимом превращении механической энергии в теплоту, поскольку в процессе деформации (контактной объемной или той и другой одновременно) происходит нарушение термодинамического равновесия. Этот вид трения включает в себя два явления: неупругость и способность к вязкому противодействию течению по аналогии с вязкостью жидкости.

Необходимым условием реализации процесса внешнего трения являются меньшая сдвиговая прочность зоны фрикционного контакта по сравнению с прочностью основного материала взаимодействующих тел, так называемый, положительный градиент механических свойств и необходимые геометрические характеристики фрикционной связи. В случае использования сферической модели неровностей для контактирующих поверхностей условие перехода внешнего трения во внутреннее находится из соотношения:

$$\frac{h}{r} \geq 0.5 \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_m} \right), \quad (3.1)$$

где h — глубина внедрения единичной неровности; r — радиус кривизны единичной неровности; τ — сдвиговая прочность молекулярной составляющей силы трения; σ_m — предел прочности трущегося материала.

На рис. 3.2 показаны области внешнего II и внутреннего I трения. Разделяющая линия описывается критериальным соотношением 3.1.

Отличия внешнего трения от внутреннего заключается в следующем:

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

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

3.2. Трение покоя и трение движения

Внешнее трение характеризуется силой внешнего трения. Она представляет собой силу сопротивления относительно перемещению, лежащую в плоскости касания двух твердых тел. Эта сила явля-

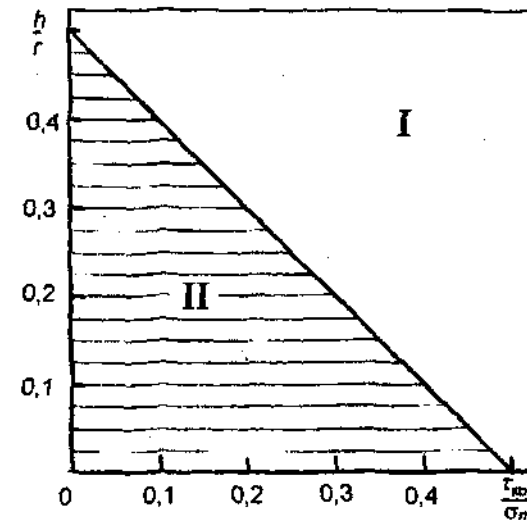


Рис. 3.2. Области внутреннего I и внешнего II трения

ется равнодействующей элементарных сил трения, возникающих в зонах контактов отдельных микронеровностей.

Сила трения — сила неконсервативная, т.е. работа этой силы зависит от расстояния, на которое перемещаются тела в тангенциальном направлении. В зависимости от величины перемещения различают силу внешнего трения покоя, неполную силу внешнего трения покоя и силу внешнего трения движения.

Неполная сила внешнего трения покоя $F_{\text{тп}}$ — сила сопротивления движению при малых частично обратимых тангенциальных перемещениях, называемых предварительным смещением ΔS (рис. 3.3). Неполная сила внешнего трения покоя $F_{\text{тп}}$ реализуется в узлах трения, где под действием приложенных к контактирующим телам усилий не происходит их непрерывное скольжение. Сила внешнего трения покоя $F_{\text{тп}}$ — значение неполной силы внешнего трения покоя, соответствующее максимальной величине предварительного смещения.

Согласно приведенным определениям сил под трением покоя понимается трение твердых тел при микросмещениях ΔS до перехода к относительному перемещению. Экспериментально установлено, что при достижении максимальной величины предварительного смещения, δ возрастание силы трения прекращается, остается неизменным и не зависит от дальнейшего перемещения. При достижении силы трения максимума, $F_{\text{тп}}$ в некоторых случаях наблюдается некоторое ее снижение до величины также независимой от перемещения (рис. 3.3).

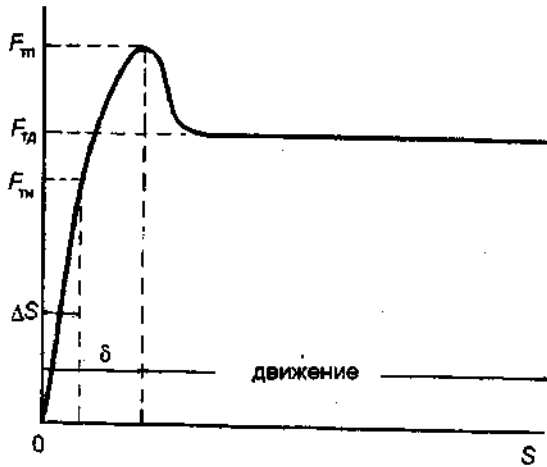


Рис. 3.3. Зависимость силы внешнего трения F_t от перемещения S

Сила трения, соответствующая непрерывному скольжению между взаимодействующими твердыми телами и не зависящая от перемещения, называется силой трения движения, $F_{тд}$.

Отношение силы трения F к нормальной относительно поверхности трения внешней силе N (или нормальной составляющей этой силы) называется коэффициентом трения f :

$$f = \frac{F}{N}. \quad (3.2)$$

Впервые понятие о коэффициенте трения ввел Леонардо да Винчи, позже Амонтон предложил формулу (3.2). Трение движения в зависимости от формы и кинетики принимает различные формы (см. рис. 3.4).

3.3. Трение скольжения. Верчение.

Трение скольжения — это вид трения движения, при котором скорости соприкасающихся тел в местах контакта различны по значению и (или) по направлению. Трение скольжения является одним из наиболее распространенных видов трения. Элементы скольжения имеют место при качении. Разновидностью трения скольжения является трение верчения. Верчение или трение верчения — это движение с относительной угловой скоростью вокруг общей нормали.

Трение скольжения согласно теории разработанной И.В. Крагельским имеет молекулярно-механическую природу. Силы молеку-



Рис. 3.4. Схема видов трения

лярного притяжения, действующие на площадках фактического контакта, вызывают адгезию между трущимися телами. Механическая составляющая силы трения обусловлена пластической деформацией поверхностей.

Молекулярная составляющая обусловлена разрушением молекулярных связей. В точках касания скользящих поверхностей механическая составляющая силы трения расходуется на процессы деформирования тонких поверхностных слоев трущихся тел.

Условия трения, структура тел, связи в них определяют соотношение молекулярной и деформационной составляющих силы трения.

Существующие расчетные зависимости позволяют производить ориентировочную оценку обеих слагаемых силы трения. В расчетах коэффициента трения используют значения контурных давлений, микротопографии поверхностей трения, механические свойства трущихся поверхностей, молекулярную составляющую коэффициента трения.

В общем случае формула для определения коэффициента трения будет иметь вид:

$$f = \frac{aS}{P} + b, \quad (3.3)$$

где a — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; S — фактическая площадь контакта; P — давление в контакте; b — коэффициент, характеризующий механическую составляющую силы трения.

3.4. Трение качения и трение качения с проскальзыванием

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

В процессе качения, например, цилиндра по плоскости (рис. 3.5) контакт осуществляется по некоторой поверхности. Если к цилиндру приложена нормальная нагрузка N и движущая сила F , то движущим моментом, численно равным моменту сопротивления качению, будет произведение $M = FR$, а коэффициентом трения качения k — отношение движущегося момента к нормальной нагрузке:

$$k = \frac{M}{N} = \frac{FR}{N}. \quad (3.4)$$

Ракция опоры N' смещена на величину эксцентриситета e относительно действия силы N . Реактивный момент или момент сопротивления качению будет равен $M' = N'e$. Из условия $M = M'$ и $N = N'$ следует, что:

$$e = \frac{FR}{N} = k, \quad (3.5)$$

т.е. коэффициент трения качения численно равен эксцентриситету e и имеет размерность длины.

Наряду с коэффициентом трения качения применяют и безразмерную величину f — коэффициент сопротивления качению, равную

$$f = \frac{k}{R}. \quad (3.6)$$

В трибологии различают чистое качение и качение с проскальзыванием. При чистом качении линия контакта двух тел должна быть прямой, контакт — упругим, а взаимодействующие тела — одноименными. В этом случае при повороте цилиндра или шара радиуса R на некоторый угол φ смещение оси относительно плоскости будет равно $R \cdot \varphi$, мгновенные оси вращения лежат в одной плоскости, а мгновенные скорости перемещения поверхностей в рассматриваемой точке совпадают по величине и направлению. На практике контакт двух тел осуществляется не по линии, а по некоторой поверхности. При этом реализуется упруго-пластический или вязкоупругий контакт и скорости перемещения тел в точке их контакта различны. Поэтому в технике в основном имеет место качение с проскальзыванием.

Сопротивление качению упругих тел обусловлено тремя причинами: гистерезисными потерями, микропроскальзыванием и адгезией в зоне контакта.

Гистерезисные потери связаны с несовершенством кристаллического строения реальных тел, т.е. с перемещением дислокаций при нагружении. При увеличении плотности дислокаций в поверхностных слоях катящихся тел растут гистерезисные потери и, следовательно, растет сопротивление качению.

Микропроскальзывание обусловлено деформацией тел при качении вследствие реализации контакта на площадке конечных размеров. Материал цилиндра испытывает деформации сжатия, а плоскости — растяжения. Поэтому при повороте цилиндра точки его поверхности в зоне контакта будут стремиться удалиться друг от друга, а точки поверхности плоского образца — сблизиться. Это приводит к проскальзыванию микроучастков контактирующих поверхностей трения одного тела относительно другого. Величина микропроскальзывания зависит от соотношения упругих свойств материалов и радиусов кривизны сопрягаемых тел. С ростом различия модулей упругости сопрягаемых тел качения потери, связанные с микроскольжением, увеличивается.

Адгезионное взаимодействие локализуется в центральной части площадки контакта. Сопротивление качению, обусловленное адгези-

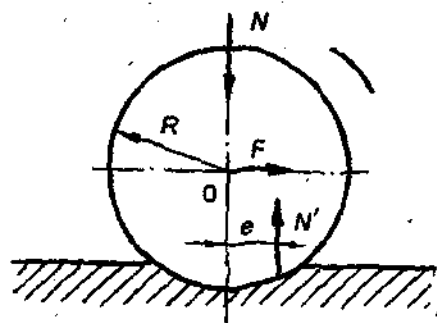


Рис. 3.5. Схема определения коэффициента трения качения k и коэффициента сопротивления качения f

онным взаимодействием, зависит от нагрузки, микротопографии контактирующих поверхностей и природы материалов тел качения.

3.5. Трение при смазке

Трение со смазочным материалом представляет собой трение двух тел, между которыми находится смазочный материал. В зависимости от толщины смазочного материала различают граничное и жидкостное виды трения. Толщина смазочного материала определяется условиями эксплуатации узла трения. Зависимость или диаграмма Герси—Штрибека иллюстрирует изменение коэффициента трения в зависимости от критерия Зоммерфельда $z \approx \mu\omega/P$, где μ — динамическая вязкость, ω — угловая скорость, P — удельная нагрузка (рис. 3.6).

Коэффициент трения согласно диаграмме имеет максимальное значение при скоростях скольжения порядка 0,1 мм/с и слое смазки h , до 10^{-4} мм, когда имеет место граничное трение, участок I (рис. 3.6). Граничное трение или трение при граничной смазке означает вид трения, когда весьма тонкий слой третьей фазы (смазки), разделяющей твердые поверхности, находится в границах влияния этих поверхностей на смазочное вещество. При этом относительная толщина смазочного слоя, определяемая из выражения:

$$h_{\text{отн}} = \frac{h_1}{R_{a1} + R_{a2}}, \quad (3.7)$$

где h_1 — толщина смазывающего слоя; R_{a1} , R_{a2} — среднее арифметическое отклонение профиля, меньше или равно единице. Граничное трение является промежуточным между так называемым сухим или трением ювенильных поверхностей и жидкостным трением.

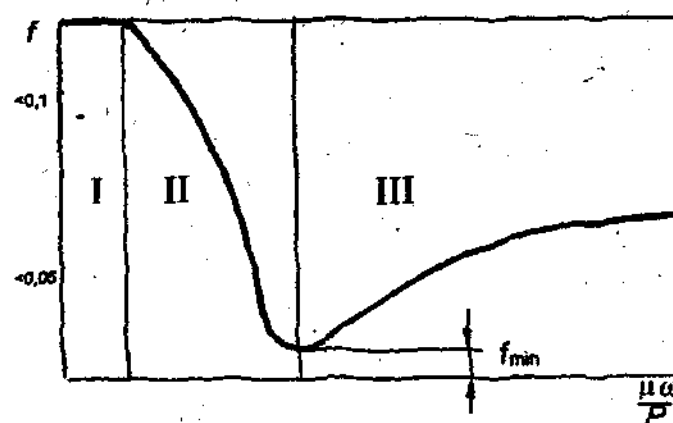


Рис. 3.6. Диаграмма Герси—Штрибека: зависимость коэффициента трения f от безразмерного параметра $\frac{\mu\omega}{P}$ (критерий Зоммерфельда) при смазке: I — граничной; II — смешанной; III — гидродинамической

Механизм трения при граничной смазке заключается в образовании прочно связанных с рабочей поверхностью слоев смазки, обладающих упругостью формы и квазикристаллическим строением, позволяющим выдерживать значительные нормальные нагрузки и в то же время имеющим пониженное сопротивление сдвигу по сравнению с твердой поверхностью. Таким образом анизотропия прочностных свойств граничного слоя, выражающаяся в высокой прочности при сдвиге и малой прочности на сдвиг обеспечивает смазочные свойства адсорбционному слою.

Граничный слой образуется в результате адсорбции на поверхностях трения твердых тел полярных молекул и поверхностно-активных компонентов смазочного материала. Процесс образования граничного слоя происходит путем последовательного наложения друг на друга мономолекулярных слоев, с нормально или перпендикулярно ориентированных к поверхности молекулами смазки. Сформированные таким образом монослой неподвижны друг относительно друга до некоторой толщины смазочного слоя, называемой критической. При увеличении толщины смазочного слоя выше некоторого критического значения происходит скольжение между молекулярными слоями, т.е. переход к жидкостному трению. Величина критической толщины граничного слоя определяется типом смазочного вещества, свойствами твердой поверхности, температурой и давлением.

Характер фрикционного взаимодействия при граничной смазке определяется соотношением двух одновременно протекающих процессов образования и разрушения граничных слоев.

В режиме граничного трения работает множество трибосопряжений машин и механизмов, например, поверхности трения поршней, поршневых колец, крестовин, обрабатываемого инструмента и т.д.

Жидкостное трение или трение при жидкостной смазке проявляется в достаточно толстой пленке смазывающего вещества, разделяющей контактирующие поверхности, при выполнении условия:

$$R_{\max 1} + R_{\max 2} < h_{\min}, \quad (3.8)$$

где $R_{\max 1}$, $R_{\max 2}$ — наибольшая высота профиля соответственно первой и второй контактирующей поверхности; h_{\min} — минимальная толщина смазочного зазора.

В результате замены внешнего трения при непосредственном контакте тел внутренним трением разделяющего их слоя жидкости уменьшается сопротивление трения и скорость изнашивания поверхностей. Жидкостное трение является оптимальной формой трения для трибосопряжений типа подшипников скольжения, направляющих, зубчатых, червячных передач, кулачков и т.д.

Жидкостное трение в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных факторов осуществляется при смазке трех видов: гидродинамической, эластогидродинамической, гидростатической.

Существуют два способа создания давления в несущем слое. При первом способе специально предусмотренный насос создает гидростатическое давление, достаточное для разделения трущихся поверхностей. Такой тип смазки называется гидростатическим. Утечка масла через торцы подшипника компенсируется соответствующей подачей его насосом. Гидростатическая смазка нашла применение в следующих случаях: для снижения трения при разгоне валов тяжелых роторных машин; в радиальных подшипниках скольжения, когда угловая скорость вала мала для образования достаточной пленки жидкости; в направляющих для снижения трения в деталях, участвующих в прямолинейном движении и в других специальных устройствах.

При втором способе смазка осуществляется жидким смазочным материалом с самовозникающим в этом слое давлением, обусловленным относительным движением. Например (рис. 3.7); в радиальном подшипнике скольжения диаметр отверстия (вкладыша) больше диаметра цапфы, в результате между цапфой и вкладышем образуется клиновидный зазор. При вращении цапфы смазывающая жидкость (смазка) увлекается силами вязкости в сужающийся зазор,

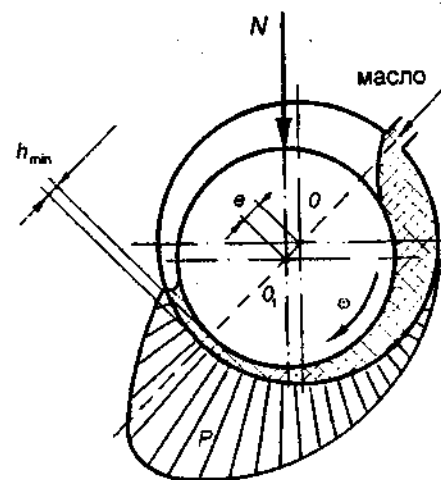


Рис. 3.7. Схема образования и распределения давления в смазочном слое радиального подшипника скольжения

что приводит к повышению давления в слое жидкости. При достаточных вязкости смазочного материала и скорости скольжения цапфы в слое масла создается давление, необходимое для отделения цапфы от вкладыша — цапфа как бы всплывает на тонком слое масла. Необходимым условием реализации гидродинамической смазки является сохранение минимальной толщины смазочного слоя, при которой проявляются объемные свойства жидкости.

Учитывая шероховатость поверхностей, наименьшая толщина слоя — минимальное расстояние между вершинами выступов неровностей сопрягающихся поверхностей. Относительная толщина смазочного слоя $h_{отн}$ при гидродинамической смазке подчиняется условию:

$$5 \leq h_{отн} \leq 100. \quad (3.9)$$

Устойчивая работа подшипника скольжения в режиме гидродинамической смазки (область III диаграммы Герси—Штрибека, рис. 3.6) обусловлена свойством нефтяных масел изменять вязкость в зависимости от температуры в рабочей зоне.

Например, если нагрузка на подшипник возрастает, то происходит уменьшение масляного слоя и подшипник приближается к режиму граничного трения. Однако вместе с этим снижается коэффициент трения за счет уменьшения z , а, следовательно, снижается тепловыделение, что способствует увеличению вязкости смазочного масла и

росту толщины смазочной пленки. При этом устанавливается новое состояние равновесия, которое может не соответствовать начальному состоянию. Безусловно существует критическое значение внешней нагрузки, превышение которого приводит к нарушению устойчивого режима работы подшипника и он теряет свою работоспособность.

Прикладная гидродинамическая теория, разработанная О. Рейнольдсом, на основании уравнения потока Навье—Стокса, уравнения неразрывности потока и закона Ньютона для жидкости, позволяет определять несущую способность масляного слоя, т.е. критическую нагрузку. В общем виде уравнение Рейнольдса имеет вид:

$$\frac{dP}{dx} = \sigma \mu V \frac{h - h_m}{h^3}, \quad (3.10)$$

где dp — изменение давления по длине масляного клина x ; μ — динамическая вязкость масла; V — скорость скольжения; h_m — зазор в сечении максимального давления; h — текущее значение зазора.

Сила трения в режиме гидродинамической смазки определяется согласно уравнению Н.П. Петрова. Для случая коаксиальных (вставленных друг в друга) цилиндров, разделенных слоем смазки (радиальный подшипник скольжения) она имеет вид:

$$F = \pi dl \frac{\mu \omega}{\psi}, \quad (3.11)$$

где d — диаметр цапфы; l — длина цапфы; ω — угловая скорость вращения цапфы; $\psi = \frac{D-d}{d}$ — относительный зазор, где D — диаметр вкладыша.

Коэффициент трения согласно формуле Петрова:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{\pi dl \mu \omega}{P d l \psi} = \frac{\pi \mu \omega}{\psi P}. \quad (3.12)$$

В случае контакта двух тел, ограниченных неконформными поверхностями, например, при трении качения или качении со скольжением масло втягивается в зону контакта движущимися поверхностями. При некоторых условиях, аналогичных условиям возникновения гидродинамической смазки между скользящими поверхностями, в масляном слое возникает подъемная сила. Вследствии малой протяженности зоны контакта и больших давлений порядка 10^2 МПа в нем масляный слой имеет толщину того же порядка, что и местные дефор-

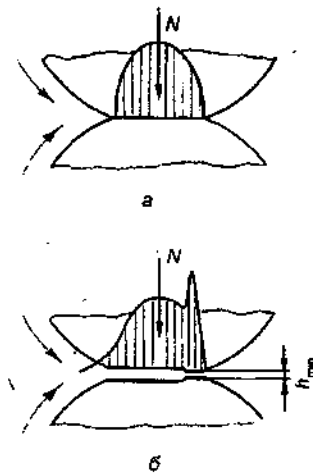


Рис. 3.8. Эпюры давления при качении двух упругих цилиндров: а — без смазочного материала; б — при эластогидродинамической смазке

мации контактирующих тел. Эти деформации влияют на конфигурацию зазора (рис. 3.8). Задача о распределении давления в слое смазочного материала в зоне контакта упругих тел является контактно-гидродинамической, а смазка эластогидродинамической.

При эластогидродинамической смазке величина относительного зазора находится в интервале:

$$1 \leq h_{отн} \leq 10. \quad (3.13)$$

Согласно эластогидродинамической теории смазки коэффициент трения является функцией материалов поверхностей, смазочного материала, нагрузки, скорости перемещения тел в контакте, температурных условий и формы контактирующих поверхностей. Важнейшим выводом эластогидродинамической теории смазки является то обстоятельство, что толщина смазочного материала может быть на два порядка больше. Она может выдерживать значительно более высокие давления, чем пленка по теории, согласно которой вязкость масла имеет постоянное значение и разделяет недеформируемые поверхности.

Эластогидродинамическое трение имеет место при работе зубчатых и червячных передачах роликоподшипниках и аналогичных деталях в условиях смазки как маслами, так и пластичными смазками. Оно характеризуется тем, что контактные деформации принципиально меняют форму зазора и что высокие давления в масле приводят к резкому изменению его вязкости.

Глава 4

ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНАШИВАНИЯ

Основные определения. Результатом фрикционного взаимодействия твердых тел или твердого тела с потоком жидкости или газа является изнашивание — разрушение и отделение материала с поверхности твердого тела. Изнашивание проявляется в постепенном изменении размеров или формы твердого тела.

Количественно износ оценивается величинами линейного износа dh , объемного износа dV и массового износа dG . Процесс изнашивания характеризуется интенсивностью линейного изнашивания, J_h :

$$J_h = \frac{dh}{S}, \quad (4.1)$$

где S — путь трения,
интенсивностью объемного изнашивания, J_V :

$$J_V = \frac{dV}{S}, \quad (4.2)$$

интенсивностью массового изнашивания

$$J_G = \frac{dG}{S}. \quad (4.3)$$

Если в приведенных выражениях вместо пути трения подставить время изнашивания t , то получим значение скорости изнашивания:

$$J_\tau = \frac{dh}{t}. \quad (4.4)$$

Тогда зависимость линейной и скоростной интенсивностей изнашивания выразится соотношением:

$$J_h = \frac{J_\tau}{v}, \quad (4.5)$$

где v — скорость перемещения при скольжении или качении.

Интенсивность изнашивания деталей машин трения J_h изменяется в пределах от 10^{-3} до 10^{-12} . Устанавливаются десять классов износостойкости — от 3 до 12 класса включительно, причем нижняя граница износостойкости в каждом классе не включается в его состав.

В зависимости от вида и характера фрикционного взаимодействия различают следующие виды изнашивания:

- абразивное;
- гидроабразивное;
- газоабразивное;
- эрозионное;
- гидроэрозионное;
- газоэрозионное;
- кавитационное;
- электроэрозионное;
- адгезионное;
- усталостное;
- коррозионно-механическое;
- окислительное;
- фреттинг, фреттинг-коррозия.

Опыт исследования изнашивания узлов трения показывает, что в конкретных условиях эксплуатации возможно проявление одновременно нескольких видов изнашивания. Однако, всегда можно выделить один вид, который вносит основной вклад в интенсивность изнашивания трибосопряжения.

Рассмотрим условия возникновения, характерные особенности, указанных видов изнашивания и поскольку это явление является нежелательным в технике, определяющим ресурс работы изделия, то способы его уменьшения.

4.1. Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание относится к наиболее интенсивным видам механического разрушения поверхности, возникающему в результате режущего или царапающего действия на нее твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии.

Характерным условием абразивного изнашивания является меньшая твердость поверхности твердого тела по отношению к абразиву — изнашивающим частицам минерального происхождения, шероховатости сопряженной поверхности, частицам износа и т.д.

Наиболее распространенным абразивом является обычно кварцевый песок, который входит в состав грунтов, почв и пыли и является главным агентом, вызывающим износ многих деталей. Абразивными

частицами могут быть окалина, структурные составляющие одного из сопряженных тел, продукты износа.

Основным признаком картины изнашивания поверхности трения является наличие на ней хорошо различимых рисок в виде мелких царапин и углублений различной протяженности, но всегда ориентированных в направлении движения абразива по отношению к материалу или материала по отношению к абразиву.

Образование рисок и углублений на поверхности трения имеют двоякое происхождение: они образуются в результате среза металла в виде микростружки, когда материал достаточно твердый и малопластичный, или это след абразивной частицы, образованной вытеснением материала в отвалы риски, когда резание не происходит из-за высокой пластичности. Вытеснение материала в отвалы — первый этап разрушения абразивными частицами. При движении соседних абразивных частиц вблизи ранее образованных отвалов на боковых поверхностях риски происходит вторичное передоформирование переориентация материала отвалов в сторону риски или его окончательное отделение от поверхности изнашивания путем одновременного развития различных деформаций.

Многочисленными исследованиями установлено, что стойкость к абразивному изнашиванию металлов зависит от прочности межатомных связей в решетке. М.М. Хрущевым применительно к технически чистым металлам и сталям в отоженном состоянии получена зависимость для оценки объема износа, V :

$$V = c \frac{NSa}{H}, \quad (4.6)$$

где N — нормальная нагрузка; S — путь трения; H — твердость истираемого материала; a — размер абразивного зерна; c — коэффициент, зависящий от абразивных свойств истирающей поверхности, условий взаимодействия, контактирующих тел, кинематики движения и закрепления абразива, остроты ребер абразива.

Процесс абразивного изнашивания наблюдается не только у металлов и сплавов, но и у неметаллических материалов, таких, как углеродистые, керамические и полимерные. В особенности подвержены действию абразива полимеры, у которых когезионная прочность меньше чем у большинства контактирующих с ними триботехнических материалов. Как и для металлов, полимерным материалам свойственно увеличение интенсивности изнашивания с ростом размера абразивных частиц. Однако, абразивная износостойкость полимерных

материалов уменьшается с ростом их модуля упругости в отличие от металлов, где имеет место обратная зависимость.

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

В натуральных условиях работы оборудования при абразивном изнашивании реализуются различные схемы внешне-силового воздействия абразива. В зависимости от вида трения систематизировано абразивное изнашивание при трении скольжения, трении качения, соударение материала с абразивом, особо выделяется взаимодействие материала с абразивом при движении деталей и инструмента в потоке частиц абразива, несомых воздухом или жидкостью.

Гидроабразивное и газоабразивное изнашивание происходящее в результате действия движущихся твердых частиц, увлекаемых потоком газа или жидкости, имеют много общего. Износ зависит от скорости удара частиц и угла наклона вектора этой скорости к поверхности изнашиваемой детали (угла атаки). Кроме того, на величину износа влияет концентрация абразивных частиц, их форма, твердость, динамическая прочность, а также физико-механические свойства изнашиваемых материалов, а также температура среды и ее кислотность.

Интенсивность массового изнашивания J_G для этих видов абразивного изнашивания связана со скоростью частиц v зависимостью:

$$J_G = Kv^m, \quad (4.7)$$

где K — коэффициент, зависящий от свойств изнашиваемого и абразивного материала, а также угла атаки; m — показатель степени, зависящий от вида изнашиваемого материала. Для $v < 100$ м/с величина m составляет для стали Ст3 — 2,3; для закаленной стали 45 — 2,5; для белого чугуна — 2,8; для базальта — 2,9. Зависимость износостойкости от угла атаки в большинстве случаев выражается кривой с минимумом, соответствующим критическому углу атаки. Величина угла атаки для крупных неметаллических материалов близка к 90° , а для металлических сплавов уменьшается по мере повышения их пластичности и составляет для мягкой стали — 30° — 40° , для закаленной — 50° — 70° . Гидроабразивное и газоабразивное изнашивание наблюдается в рабочих колесах и направляющих аппаратах гидравлических турбин, лопатках газовых турбин, трубах водяных экономайзеров и паровых котлов, лопастях дымососов, трубах и насосах земснарядов, подшипниках гребных валов судов при плавании на мелководье и т.п.

4.2. Эрозионное изнашивание

Эрозионное изнашивание происходит в результате воздействия на поверхность потока жидкости или газа.

В зависимости от вида действующего вещества различают гидроэрозионные, газэрозионные, электроэрозионные виды изнашивания, а также кавитацию и абляцию.

Характерной особенностью эрозионного изнашивания являются ярко выраженные неровности и огрубление поверхности в результате удаления локальных микрообъемов при воздействии потока среды.

Интенсивность эрозионного изнашивания зависит от скорости потока, угла атаки с изнашивающей поверхностью, механических свойств и концентрации действующих частиц, агрессивности среды, физико-механических и химических свойств поверхностных и приповерхностных слоев материала.

Многочисленными исследованиями установлена связь между прочностью когезионной связи в металлах и их стойкостью к эрозионному изнашиванию. Общей тенденцией является снижение интенсивности эрозионного изнашивания с повышением прочности когезионной связи у металла. Однако, сравнение эрозионной стойкости различных классов материалов (керамики, стекла, металлов, полимеров) не обнаружило связи с их механическими свойствами.

В качестве характеристики эрозионного износа принимают отношение массы изношенного материала к массе изнашивающегося:

$$J_{\text{эр}} = \frac{V\rho_s}{\frac{4}{3}\pi R^2\rho_r q}, \quad (4.8)$$

где V — изношенный объем; ρ_s и ρ_r — плотности изношенного материала и изнашивающих частиц, соответственно; R — радиус частиц; q — число частиц вызывающих износ.

Рассмотрим отдельные виды эрозионного изнашивания.

Гидроэрозионное изнашивание представляет собой эрозионное изнашивание в результате воздействия потока жидкости на твердое тело. Разрушение твердого тела обусловлено трением сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Скорость изнашивания в этом случае мала. Динамическое воздействие потока или струи способно в зависимости от свойств материала вырывать отдельные объемы или группы зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладаю-

щих способностью наклепываться, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются и вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Гидроэрозионному изнашиванию подвержены отсчетные кромки золотников гидравлических агрегатов, клапаны запорных и регулирующих устройств гидравлических систем и т.д.

Кавитационное изнашивание. Если поток жидкости, действующий на твердое тело, содержит пузырьки газа, которые захлопываются вблизи поверхности, то гидроэрозионное изнашивание переходит в кавитационное изнашивание.

Этот вид изнашивания происходит в движущемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препятствий на его пути. При этом давление в потоке может упасть до давления, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. В этот момент может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Образовавшиеся парогазовые пузыри, размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности. Ударные волны на поверхности приводят к отделению материала.

Кавитационный износ типичен для деталей машин, работающих в жидких средах.

Процесс образования гидродинамической кавитации связан с образованием каверн — кавитационных пузырьков.

Частота образования каверн при условии сохранения их изнашивающего воздействия характеризуется критерием Струхала:

$$S_h = \frac{Hd}{V}, \quad (4.9)$$

где H — число каверн, возникающих в секунду; d — характерный размер тела; V — скорость потока жидкости.

Кавитационное изнашивание приводит к увеличению шероховатости поверхности подобно химическому травлению.

Этот вид изнашивания наблюдается в гребных винтах, лопатках центробежных и пропеллерных насосов, лопастях гидравлических турбин.

Уменьшить воздействие кавитационного износа можно конструктивными методами, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования. Другим способом борьбы с кавитационным изнашиванием является введение в воду веществ, образующих и способствующих образованию эмульсий, понижающих поверхностное натяжение. Стойкость к кавитационному изнашиванию увеличивается введением в состав стали никеля, хрома, закалкой с нагревом ТВЧ, цементацией, наплавкой твердых материалов.

Газоэрозионное изнашивание представляет собой эрозионное изнашивание в результате воздействия потока газа на поверхность твердого тела. Механизмы газоэрозионного и гидроэрозионного изнашивания подобны.

Газоэрозионное изнашивание, например, происходит на стальных и чугунных поршневых кольцах авиационных двигателей в результате прорыва газов. Отдельные, наиболее размягченные частицы металла, в результате местного разогрева рабочей поверхности кольца отрываются и уносятся потоком газов. Более стойкие структурные составляющие, оказываясь изолированными, тоже поддаются разрушению. На поверхности образуются продолговатые раковины ветвистого строения.

Если газовая среда имеет высокую температуру, то газоэрозионное изнашивание переходит в абляционное изнашивание, при котором происходят химические превращения и деструкция. Абляционному изнашиванию подвержены наружные элементы космических объектов при прохождении плотных слоев атмосферы, головки плазменных горелок, детали реактивных двигателей и т.д.

Электроэрозионное изнашивание наблюдается при воздействии разрядов на поверхности трения при прохождении электрического тока. Этот вид изнашивания происходит при трении электрических контактов, токосъемников, коллекторов электрических машин и включает два вида изнашивания: механическое и электрическое.

Электрическое изнашивание в зависимости от механизма токопрохождения через контакт и сочетания материала контактных элементов может быть в основном обусловлено переносом ионов материала одного элемента на другой; фриттингом оксидных пленок, приво-

дящим к увеличению сил молекулярного сцепления между чистыми металлами и последующим микросхватыванием вырыванием; искрением и дугообразованием, приводящим к выделению большой тепловой энергии в зазоре между контактами и испарению металла или разбрызгиванию его в контактный зазор с резким ухудшением качества поверхности, что в свою очередь увеличивает механический износ.

Механическое изнашивание проявляется в электрических контактах в тех же формах, что и в обычных парах трения, работающих с небольшими нагрузками. Уменьшение величины электроэрозионного изнашивания достигается применением специальных смазочных составов для электрических контактов.

4.3. Адгезионное изнашивание

Адгезионное изнашивание возникает вследствие действия межповерхностных сил, образования адгезионных связей между контактирующими поверхностями. Этот вид изнашивания происходит при ограниченном количестве актов фрикционного взаимодействия. В локальных зонах фактического контакта под действием нормальных, тангенциальных сил и температуры подвергаются разрушению смазочные слои, пленки адсорбированных веществ и оксидов. Молекулярное (адгезионное) взаимодействие между поверхностями превосходит прочность связи между отдельными элементами материала в напряженно-деформированной зоне трения. Адгезионное соединение оказывается прочнее менее прочного материала и происходит когезионное разрушение материала, т.е. притяжение между частицами одного и того же тела.

Результатом адгезионного взаимодействия является подповерхностное разрушение трущихся материалов, фрикционный перенос. С ростом интенсивности адгезионного взаимодействия возможно появление заедания, возникновение "холодной сварки".

Величина адгезионного взаимодействия связана с особенностями электронного строения контактирующих тел, концентрацией валентных электронов, плотностью свободных электронов на поверхности раздела, дефектами кристаллической решетки, наличием фрикционных групп в полимерных материалах.

В настоящее время отсутствует точная теория адгезии, что не позволяет расчетным путем прогнозировать силу адгезионного взаимодействия. Поэтому для оценки величины адгезионного износа пользуются приближенными расчетными зависимостями.

Согласно модели Арчарда адгезионный износ зависит от нормальной нагрузки, определяющей суммарную площадь фактического

* Фриттинг — электрический пробой, возникающий при достижении величины электростатического поля внутри пленки, $\sim 10^9$ В/см.

контакта, на которую действуют поверхностные силы упругих напряжений и деформаций.

Величина объемного износа V по Арчарду имеет вид:

$$V = K \frac{NS}{H}, \quad (4.10)$$

где K — коэффициент адгезионного износа; H — твердость более мягкого материала; S — путь трения; N — нормальная нагрузка.

Обычно пластическая деформация шероховатостей имеет место при начальном касании тел. Последующие условия контактирования приводят к упругопластическим и упругим деформациям. Значение износа зависит не только от нагрузки, твердости и пути трения, но и от топографии поверхности действующих температур, физико-механических свойств приповерхностных слоев, смазочных материалов и окружающей среды.

Для приближенной оценки объема адгезионного износа V в условиях граничной смазки используют формулу Роу:

$$V = K_{и} \frac{(1 + 3f^2) N d_a S}{vt_0} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (4.11)$$

где $K_{и}$ — коэффициент износа; f — коэффициент трения; H — твердость более мягкого материала; v — скорость скольжения; d_a — диаметр адсорбированной молекулы; t_0 — период колебания адсорбированной молекулы; Q — теплота адсорбции; R — газовая постоянная, T — абсолютная температура в контакте.

Адгезионное изнашивание возникает при недостаточном количестве или отсутствии смазочного материала в опорах скольжения или качения, зубчатых передачах, кулачковых механизмах, при механической обработке материалов.

Наиболее подвержены адгезионному износу фрикционные узлы космической техники, вакуумного оборудования, атомной техники и высоконагруженные сопряжения, работающие в газовых и жидких агрессивных средах.

Снижение адгезионного износа достигается использованием металлов с гексогональной кристаллической структурой и с плотной упаковкой атомов. Легирующие элементы такие как углерод и сера также уменьшают адгезионный износ.

В композиционных материалах меньший адгезионный износ имеет место при направлении волокон, перпендикулярном направле-

нию скольжения, и при ориентации волокон торцами к трущимся поверхностям.

4.4. Усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание возникает при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя в процессе трения. Характерным признаком усталостного изнашивания является возникновение сети поверхностных и подповерхностных микротрещин, которые при соединении образуют частицы износа. На поверхностях трения, подверженных усталостному изнашиванию, образуются разрушения в виде ямок, раковин диаметром от десятка микрометров до нескольких миллиметров, называемых питтингом, осповидного изнашивания, отслаивания.

Процесс трещинообразования ускоряется при наличии концентраторов напряжения. К поверхностным концентраторам напряжений относятся дефекты в виде царапин, вмятин, рисок, прижогов и т.д. Подповерхностные концентраторы напряжений — неметаллические включения, микропоры, карбиды и т.д.

Образование микротрещин при циклически изменяющихся контактных напряжениях обусловлено стадийным накоплением повреждений. Так, например, для кристаллических тел вначале происходит накопление упругих искажений решетки и увеличение плотности дислокаций. После достижения критической плотности дислокаций возникают субмикроскопические трещины. Вместе с необратимыми искажениями кристаллической решетки нарушаются межатомные связи и разрушаются отдельные микрообъемы.

В отличие от металлов одной из основных причин усталостного изнашивания материалов на основе полимеров является трибоккрекинг полимерных молекул, происходящий вследствие интенсивного контактного механического и термического воздействий. Подтверждением этого является снижение молекулярной массы полимера в поверхностном слое и аморфизация структуры кристаллизирующихся полимеров.

Интенсивность усталостного изнашивания зависит от множества факторов. Наиболее значимые из них: физико-механические свойства поверхности, параметры микрогеометрии, частота изменения напряжения в приповерхностных и поверхностных слоях положены И.В. Крагельским в основу фрикционно-усталостной модели изнашивания.

Согласно этой модели при относительном скольжении трущихся тел разрушение происходит в результате многократного деформиро-

вания истираемого материала жесткими микронеровностями контр-тела.

Интенсивность изнашивания J_h при усталостном изнашивании определяется по формуле:

$$J_h = \frac{K_1 \alpha p_a}{n p_r} \left(\frac{n}{r} \right)^{1/2}, \quad (4.12)$$

где h — глубина внедрения единичной неровности; r — радиус единичной неровности; p_a и p_r — соответственно номинальное и фактическое давления; K_1 — коэффициент, зависящий от геометрической конфигурации и расположения неровностей по высоте, обычно $K_1 \approx 0,2$, α — отношение номинальной площади к площади трения (коэффициент взаимного перекрытия); n — число циклов, которое выдерживает деформируемый объем до разрушения. Интенсивность усталостного изнашивания может изменяться в широких пределах от 10^{-3} до 10^{-12} .

Если принять, что при фрикционном взаимодействии имеет место упругий контакт и подставить соответствующие выражения для фактического и контурного давления, формула преобразуется в расчетную формулу, пригодную для инженерного расчета на износ:

$$J = K_2 \alpha K_{fy} p^{1+t_y/5} E^{4t_y/5-1} \Delta^{2t_y/5} \left(\frac{Kf_m}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (4.13)$$

где

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

t_y — показатель кривой фрикционной усталости, определяемый на циклометре или испытаний на износ; $\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}$ — комплексная характеристика шероховатости, определяемая по параметрам шероховатости; E — модуль упругости изнашиваемого материала; σ_0 — предел текучести; p — номинальное давление в контакте; ν — параметр опорной кривой; f_m — молекулярная составляющая коэффициента трения; K_{fy} — поправочный коэффициент.

Усталостное изнашивание в основном происходит в хорошо смазываемых механизмах, трущиеся сопряжения которых работают в режимах кинематического качения, скольжения или качения с проскальзыванием. Наиболее подвержены усталостному изнашиванию

зубчатые передачи, подшипники качения, кулачковые механизмы и т.д.

Увеличение сопротивления усталостному изнашиванию достигается улучшением физико-механических свойств приповерхностных и поверхностных слоев материала, заданием оптимальных параметров микрогеометрии поверхностей трения.

4.5. Коррозионно-механическое изнашивание

Коррозионно-механическое изнашивание происходит в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим или электрическим взаимодействием материалом со средой.

Активированные трением поверхностные слои материала увеличивают свою способность к адсорбции, диффузии и химическим реакциям. При этом, если активность окружающей среды настолько велика, что является определяющей в процессе разрушения поверхностей трения, то имеет место коррозионно-механическое изнашивание. Иначе говоря, разрушение поверхности тела происходит под действием механического изнашивания (абразивного, усталостного, адгезионного) и коррозии в результате химического или электрохимического взаимодействия материала со средой. Химическое взаимодействие происходит при контакте поверхности трения с сухими газами или с неэлектропроводными агрессивными жидкостями.

Электрохимическая коррозия — при контакте металлов с электролитами. Например, водными растворами кислот, щелочей, солями, расплавами солей. При этом наблюдаются два процесса: анодный (непосредственный переход атомов металла в раствор в виде ионов) и катодный (ассимиляция избыточных электронов атомами или ионами раствора).

Образующиеся на контактирующих поверхностях пленки при трении в активных средах могут легко удаляться и тогда происходит схватывание или выполняют защитную функцию, снижают интенсивность изнашивания.

Коррозионно-механическому изнашиванию подвержены уплотнительные кольца торцевых уплотнений реакторов, центрифуг, подшипники скольжения реакторов, насосов, распыляющие диски центробежных сушилок, мешалки реакторов, колеса и корпуса центробежных насосов, шнеки, втулки смесителей и грануляторов.

Интенсивность коррозионно-механического изнашивания зависит в первую очередь от коррозионной стойкости контактирующих материалов и от состава окружающей среды.

Для уменьшения величины коррозионно-механического изнашивания триботехнические материалы должны обладать хорошей

коррозионной стойкостью в сочетании с высокими антифрикционными свойствами.

Увеличение коррозионной стойкости достигается введением ингибиторов в агрессивную среду и обработкой поверхностей трения. Металлические материалы с целью повышения твердости и улучшения коррозионной стойкости подвергаются термообработке, для снижения склонности нержавеющей сталей к схватыванию и заеданию применяют азотирование и хромирование. Хороший эффект дают силикатные покрытия.

Для работы в агрессивных средах применяют высоколегированные нержавеющие стали: 14X17H2, 20XВH4Г9, 12X18H10, 08X17H15M3T и др.; в паре с мягкими антифрикционными материалами углеродистые, композиты на основе фторопласта-4.

Окислительное изнашивание представляет собой разновидность коррозионно-механического изнашивания, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. При окислительном изнашивании на соприкасающихся поверхностях образуются пленки оксидов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Продукты износа представляют собой оксиды металлов. От других видов коррозионно-механического этот вид изнашивания протекает в отсутствие агрессивной среды в условиях трения без смазки или при недостаточном ее количестве. Изнашиваемые поверхности имеют низкую шероховатость; это объясняется тем, что оксиды препятствуют адгезионному схватыванию на пятнах фактического контакта.

Интенсивность окислительного изнашивания активизируется при повышении температур в зоне фрикционного контакта и пластической деформации поверхностных слоев.

Окислительному изнашиванию подвергаются калибры, детали шарнирно-болтовых соединений подвесных устройств машин, работающих без смазочного материала, металлические колеса фрикционных передач и чашки вариаторов, подшипники сухого трения, пластины и цилиндры центробежных воздуходувок и т.д.

Для уменьшения интенсивности окислительного изнашивания стремятся снизить температуру фрикционного разогрева подбором оптимального состава смазочного материала. Хороший результат дает повышение твердости поверхностей трения.

Водородное изнашивание — другая разновидность коррозионно-механического изнашивания, возникающее вследствие поглощения трущейся металлической поверхностью водорода. Последний выделяется при деструкции смазочного материала, пластмассы и наливки влаги.

Водородное изнашивание проявляется в намазывании металла на сопряженный материал, например, намазывание бандажной стали на тормозную колодку, перенос стали с поверхности коленчатого вала на мягкий баббитовый подшипник. В сталях и чугунах эндотермический процесс поглощения водорода обуславливает диффузию выделяющегося в зоне трения водорода в глубь металла в область максимальных температур, где и проявляется охрупчивание материала. В металлах с экзотермическим процессом поглощения водорода, например, титане, водород насыщает холодные участки поверхности.

Основным средством борьбы с водородным изнашиванием является подбор смазок и контактирующих полимерных материалов.

4.6. Фреттинг

Изнашивание при фреттинге (от английского *frot* — подтачивать, разъединять) возникает при малых колебательных, возвратно-поступательных перемещениях с амплитудами от нескольких единиц до сотни микрометров.

Повреждения поверхностей трения концентрируются на небольших участках и напоминают точечную коррозию.

Трибосопряжение, работающее в режиме фреттинга, находящееся в коррозионно-активной среде, подвержено более интенсивному виду изнашивания — фреттинг-коррозии.

Изнашивание при фреттинг-коррозии имеет двухстадийный характер. Первоначально трение приводит к упрочнению микровыступов взаимодействующих поверхностей в местах фактического контакта. Одновременно происходит разрушение оксидных слоев и межатомное взаимодействие ювенильных поверхностей. Вследствие разрушения узлов схватывания и усталостного повреждения неровностей образуются продукты изнашивания, формируется коррозионно-активная среда.

Для второй стадии характерно преобладание коррозионно-усталостных разрушений, приводящих к увеличению интенсивности изнашивания.

На фреттинг-коррозию оказывают влияние: амплитуда относительного скольжения, контактное давление, частота колебаний, число циклов нагружений, внешняя среда, температура. Интенсивность разрушения поверхностей также зависит от склонности к разупрочнению поверхностных слоев, к их разрыхлению вследствие электрохимического, коррозионно-усталостного, знакопеременного, циклического деформирования.

Расчетные зависимости для определения интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии имеют приближенный оценочный

характер. Для большинства видов сопряжений повышение амплитуды проскальзывания вызывает увеличение интенсивности изнашивания. С ростом удельной контактной нагрузки может изменяться характер повреждения материала от усталостно-коррозионного до возникновение схватывания, взаимного переноса металла. Больше разрушение поверхности характерно для низких частот колебаний.

Существенно влияет на интенсивность изнашивания коррозионная активность окружающей среды. Например, износ в воздушной среде и в среде кислорода выше, чем в вакууме, азоте и других инертных газах. Разрушение открытых поверхностей идет более интенсивно в зимнее время. По мере снижения отрицательных температур скорость изнашивания увеличивается.

Изнашивание при фреттинг-коррозии возникает в заклепочных, болтовых, шлицевых, шпоночных, штифтовых соединениях, прессо-вых посадках деталей, стальных канатах, шарнирах, соединениях муфт, рессорах, клапанах, регуляторах электрических контактов, несущих элементов вертолетов и самолетов, деталях газотурбинных двигателей.

Для уменьшения износа от фреттинг-коррозии используют смазочные материалы, в которых кислород имеет низкую растворимость, с пониженным коэффициентом диффузии, с высокой противокислительной стабильностью, с повышенными адгезионными, адсорбционными свойствами к контактирующим поверхностям. Нанесение неметаллических покрытий, использование прокладок коррозионно-стойких материалов также уменьшают интенсивность изнашивания. Большое значение имеет правильный выбор контактирующих материалов, имеющих повышенную сопротивляемость абразивному, усталостному, коррозионному разрушению.

Глава 5 ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Триботехническое материаловедение или трибоматериаловедение представляет раздел науки о строении и свойствах материалов и является связующим звеном между результатами трибологических теоретических исследований и комплексом знаний, составляющих основы триботехники.

Триботехнические материалы классифицируются по составу на следующие основные группы: металлы и сплавы; композиционные материалы с металлической, полимерной и керамической матрицей; смазочные материалы и присадки; гибридные материалы.

5.1. Металлы и сплавы

Металлы и сплавы являются одними из основных материалов, которые используют для узлов трения. Это обусловлено тем, что они благодаря таким качествам как прочность, пластичность, способность образовывать различные виды соединений с одним или несколькими элементами, больше других материалов удовлетворяют разнообразным требованиям условий работы трущихся поверхностей. В зависимости от химической природы элементов и условий, в которых находится трибологическая система, металлы могут образовывать между собой, а также с неметаллами, твердые растворы, эвтектические смеси и химические соединения.

Основные исследования триботехнических металлов и сплавов ведутся в направлении разработки структурных критериев их модификации, совместимости с различными материалами, способности мягкой фазы сплава образовывать пластичные пленки переноса, усталостной прочности и т.д.

Наибольшее распространение в узлах трения получили чугуны и стали, фрикционные свойства которых определяются их структурой. Каждая из структурных составляющих обладает различными свойствами, что учитывается при выборе технологии обработки металлов для различных узлов трения (табл. 5.1). Чаще всего с увеличением содержания углерода возрастает твердость и износостойкость сплавов.

Для повышения износостойкости стали и чугунов применяют термическую или химико-термическую обработку: цементацию азотирования, нитроцементацию, цианирование, сульфидирование, борирование, легирование хромом, никелем, марганцем, вольфрамом,

Таблица 5.1. Характеристики структурных составляющих стали и чугуна и их влияние на износостойкость

Структурная составляющая	Характеристика	Влияние на износостойкость
Феррит	Твердый раствор углерода в α -железе	При наличии ферритной основы стали и чугуны имеют малую твердость и невысокую износостойкость
Аустенит	Твердый раствор углерода в γ -железе	Отличается склонностью к упрочнению при пластической деформации, поэтому несмотря на невысокую твердость обладает хорошей износостойкостью, особенно в условиях удара и пластического контакта
Карбиды	Химические соединения железа с углеродом — цементит (6,67% С) при легировании — хим. соед. железа с углеродом и легирующими элементами — сложные карбиды	Входя в состав перлитов, карбиды повышают износостойкость сталей и чугунов
Перлит	Ферритно-цементитная смесь (типы перлита: зернистый, пластинчатый, сорбит, троостит)	С увеличением содержания перлита до 30% износостойкость возрастает, в дальнейшем почти не меняется. Наиболее износостойки структуры с пластинчатым перлитом
Мартенсит	Перенасыщенный твердый раствор углерода в α -железе (структура закалки)	Имеет высокую прочность и твердость, обладает высокой износостойкостью
Графит	Кристаллическая модификация углерода (типы: пластинчатый, хлопьевидный, шаровидный)	Включения графита (особенно шаровидного) действуют как смазка, уменьшают коэффициент трения, повышают износостойкость

молибденом, ванадием, поверхностное упрочнение, наклеп, обкатку шариками, поверхностное выглаживание, калибрование и др.

Износостойкость металла также зависит от структуры формируемой в приповерхностном слое в результате фрикционного взаимодействия. Изменение структуры металла активного приповерхностного слоя обусловлено деформацией и термическим воздействием в зоне контакта. В зависимости от интенсивности и степени механотермического воздействия в металле происходит местное изменение химического состава, вторичная закалка, отпуск, процессы рекристаллизации, образование так называемых "белых зон" — неравновесных структур, характеризующихся особо напряженным состоянием. Основные структуры, образующиеся при трении — вторичный аустенит

и вторичный мартенсит, имеют более высокую микротвердость, чем металл в исходном состоянии и более высокую износостойкость.

Общим условием при разработке стальных материалов для узлов трения является создание структур, состоящих из твердых частиц, распределенных в сравнительно мягкой основе.

Для деталей, имеющих твердость выше HRC 50, оптимальной является структура отпущенного мартенсита. При твердости ниже HRC 50 лучшей износостойкостью обладает сталь со структурой игольчатого троостита закалки. Для тяжело нагруженных деталей, подвергающихся цементации и закалке с низким отпуском, не допустимо наличие сплошной карбидной сетки по границам зерен. В этом случае после цементации перед закалкой рекомендуется проведение дополнительной термообработки — нормализации. Процесс термообработки и соответственно выбор структуры стали производится таким образом, чтобы в металле наряду с прочностью обеспечивался запас пластичности, благодаря чему повышается ее сопротивление пластической деформации и местному разрушению.

Стали 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 85 используют для малонагруженных зубчатых колес, осей, кулачков.

Путем легирования удается значительно повысить фрикционные свойства сталей. Цементуемые улучшаемые стали, содержащие 0,1...0,3% углерода и 0,2...4,4% легирующих элементов, после насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска приобретают высокую поверхностную твердость (до 58...63 HXX) при вязкой центральной части. Стали 12ХН3А, 20ХН3А, 20ХН4А применяют для изготовления деталей средних и больших размеров, работающих в условиях интенсивного изнашивания. Особо ответственные детали, например, зубчатые колеса авиационных и судовых двигателей, изготавливают из сталей 18Х2Н4МА, 18Х2Н4ВА.

Износостойкие конструкционные стали типа ШХ15, ШХ15ГС, обладают высоким сопротивлением контактной усталости и истиранию за счет высокой твердости, однородности структуры, минимального содержания неметаллических включений и металлургических дефектов. Для изготовления деталей, эксплуатируемых в условиях трения скольжения, применяют графитизированную сталь, имеющую структуру ферритно-цементитной смеси и графита.

Достижение высоких антифрикционных свойств чугуна достигается возможным включениям графита и фосфидной эвтектике, которые определяются структурой. Необходимая структура чугуна получается вырыванием состава сплава, условиями охлаждения литья и последующей термообработкой.

Влияние включений графита на антифрикционные свойства чугуна зависит от его количества, формы и характера распределения в основной структуре. В процессе фрикционного взаимодействия графит выполняет двойную роль: являясь непрочной составляющей структуры чугуна, он уменьшает его сопротивление силам трения, а как продукт изнашивания — играет роль смазки. Положительное свойство графита сказывается и в том, что в процессе изнашивания он заполняет микропоры на поверхностях трения, уравнивая давления, действующие на пятна фактического контакта. Установлено, что при одном и том же содержании графита износостойкость возрастает с уменьшением размера графитовых включений и при замене пластинчатой формы на шаровую или глобулярную. Так, например, высокопрочный чугун марок ВЧ35, ВЧ45, ВЧ60, ВЧ80, ВЧ120, в котором частицы свободного графита имеют шаровидную форму, используют для изготовления ответственных деталей в транспорте и машиностроении.

Среди легированных чугунов в узлах трения применяют износостойкие высокохромистые чугуны типа 4Х9Н5, 4Х1М2, 4Х22, антифрикционные перлитный АЧС-1, АЧС-2 и перлитно-ферритный АЧС-3 чугуны.

Фосфидная эвтектика, в которую входит соединение Fe_3P , находящаяся в виде твердого включения в перлитной или мартенситной структуре, повышает износостойкость чугуна, при содержании фосфора в пределах 0,3...1%. Если фосфидная эвтектика находится в виде включений в ферритной основе чугуна, то эти включения легко выкрашиваются из слабой ферритной основы и начинают играть роль абразивных частиц в зоне трения, что отрицательно сказывается на износостойкости пары трения.

Наибольшее распространение сплавов на оловянной и свинцовой основах получили баббиты. Первый подшипниковый сплав был разработан в 1839 г. англичанином И. Баббитом. Он содержал 82...84% Sn, 5...6% Cu и 11...12% Sb. Этот сплав положил начало использованию мягких белых антифрикционных сплавов в технике, и поэтому все последующие сплавы на оловянной и свинцовой основах стали называть баббитами. Баббиты обладают низкой твердостью (НВ 13...22), имеют низкую температуру плавления (240...320 °С), повышенную размягчаемость (НВ 9...24 при 100 °С), хорошо прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами.

Баббиты имеют гетерогенную (неоднородную) микроструктуру с твердыми кубическими кристаллами химического соединения SnSb (β фазы) в мягкой пластичной основе — оловянисто-медная эвтектика. Мягкая основа баббитов при трении в подшипнике изнашивается

быстрее, чем вкрапленные в нее твердые кристаллы других составляющих, в результате трение происходит по этим твердым кристаллам. При этом уменьшается площадь фактического контакта, что, в свою очередь, снижает коэффициент трения и облегчает поступление смазки в зону трения.

В инженерной практике используют узлы трения, содержащие слой баббита толщиной от 1 до 3 мм. Баббиты применяют для заливки подшипников скольжения, работающих при давлениях не более 10...15 МПа и температурах не выше 100...120° С.

К недостаткам баббитов следует отнести невысокую усталостную прочность, особенно тонкослойных подшипниках (толщина слоя баббита менее 1 мм). Составы баббитов стандартизированы. ГОСТ 1320—74 — марки Б88, Б83 и ГОСТ 1209—73 — марки БК1, БК2. В США выпускаются баббиты марок SAT11, SAE12.

Сплавы на медной основе, известные как бронзы и латуни, широко используются для изготовления подшипников скольжения. Бронзы принято делить на оловянистые (БрОЦС 5-5-5 и др.) и безоловянистые (БрСуНЦСФ 3-3-3-20-02), в состав основных легирующих добавок которых, кроме того, входят Zn, Pb, Ni, P. Подшипники из бронзы изготавливают в монометаллическом и биметаллическом исполнении. Монометаллические подшипники изготавливаются из бронз, обладающих достаточной твердостью и жесткостью. Биметаллические подшипники представляют собой стальную деталь с нанесенным слоем бронзы, содержащей повышенное количество свинца без олова или с небольшим количеством его, например, бронза БрС30 (30% Pb).

Для изготовления свертных втулок, торцовых дисков и других антифрикционных деталей применяют деформируемые оловянистые бронзы (БрОФ 6,5-0,15, БрОЦС 4-4-2,5). В тяжело нагруженных трущихся деталях (дорожные машины, тяжелое станочное оборудование, скользящие соединения теплопередающего оборудования) в большей степени используются высокопрочные алюминиевые бронзы (например, БрАМц 9-21, БрАЖН 11-6-6 и др.).

Бронзы проявляют в большей степени антифрикционные свойства в парах трения с закаленной сталью. Из-за плохой пластичности и прирабатываемости подшипников, изготавливаемых из бронз, требуется особенно тщательная их подгонка и сборка и повышенная твердость шеек стальных валов.

В меньшем объеме, чем бронзы, в качестве антифрикционных материалов применяются латуни — сплавы меди с цинком и другими металлами. По названию преобладающего легирующего металла различают кремнистые (ЛКС 80-3-3 — содержание Si до 2,5...4%), мар-

ганцевистые (ДМцС 58-2-2 — содержание Mn до 2,5%) и алюминиево-железистые латуни (ЛАЖ 60-1-1Л — содержание Al до 1,5%, Fe до 1,5%).

Сплавы на алюминиевой основе благодаря достаточно высокой усталостной прочности, коррозионной стойкости в маслах, задиристости и хорошим антифрикционным свойствам, находят все большее применение в технике, вытесняя некоторые марки бронзы.

Алюминиевые сплавы разделяются на две группы по микроструктурному признаку, отражающему фрикционные свойства сплава. К первой группе относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих ($FeAl_3$, Al_3Ni , $CuAl_2$, Mg_2Si , $AlSb$, кремний и др.) например, АН-2,5 (2,7...3,3% Ni, остальное Al). Эти сплавы употребляются для изготовления монометаллических деталей (втулок, подшипников, шарниров и т.д.). В сплавах второй группы наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения. Сплавы этой группы марок АО9-1 (1% — Cu, 9% — Sn), АО3-1 и т.д. используются при изготовлении биметаллических подшипников в качестве слоя, закрепленного на стали в процессе совместного пластического деформирования при прокатке.

В связи с появлением тяжело нагруженных двигателей в автомобилестроении, тракторостроении, транспортном машиностроении были разработаны состав и метод получения алюминиево-свинцового сплава при содержании свинца до 30%. Этот состав обладает способностью хорошо сопротивляться задиру при ультратонких смазочных слоях.

Сплавы на цинковой основе наибольшее применение нашли на железнодорожном транспорте благодаря ряду ценных свойств, дающих возможность их использования взамен бронз и баббитов.

Сплавы на цинковой основе, имея низкую температуру плавления ($\sim 400^\circ C$), размягчаются при фрикционном разогреве, что обуславливает ускорение приработки и уменьшение изнашивания сопряженных стальных поверхностей по сравнению с бронзами. Кроме того, эти сплавы весьма технологичны при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей.

В состав сплавов на цинковой основе, например, марки ЦАМ9-1,5, входит 9,0...11% Al, 1...2% Cu, 0,03...0,06% Mg.

5.2. Композиционные материалы

Композиционные материалы с металлической матрицей включают в себя те композиты, в которых в качестве исходного связующего элемента используются порошкообразные, волокнистые и литые материалы. Наибольшее распространение в последние годы получают спе-

ченные из металлических порошков антифрикционные и фрикционные композиты, содержащие легирующие элементы и разнообразные функциональные добавки.

Получение композиционных материалов с металлической матрицей методом порошковой металлургии заключается в прессовании или прокатке порошков на железной или медной основах с последующим их спеканием.

В качестве обязательной добавки спеченные материалы содержат самосмазывающиеся порошки графита, дисульфида молибдена, нитрида бора и т.д., например, спеченный материал марки ЖГр-3-Д-3 содержит 94% Fe, 3% C (графит) и 3% Cu, а материал АЖГр-6-3 включает 90% Al, 6% Fe, 4% C (графит). Технология формирования изделий из порошковых материалов оказывает существенное влияние на их фрикционные характеристики.

Выбором режима спекания можно получить пористые материалы с различными размерами пор. Пористые спеченные материалы перед установкой в узлы трения дополнительно пропитывают жидкими смазочными материалами. Это позволяет использовать детали, полученные методом порошковой металлургии, в узлах трения с недостаточной смазкой, при отсутствии или недопустимости применения системы смазывания.

Известным разработчиком порошковых материалов является научно-исследовательский институт порошковой металлургии (НИИПМ, Минск).

В настоящее время спеченные материалы успешно конкурируют с металлическими сплавами. Железнографитовые спеченные материалы работают в узлах трения при давлениях до 15 МПа и температурах до $150^\circ C$.

Из спеченных алюминиевых сплавов наибольшее применение в качестве подшипниковых материалов получили материалы типа АСМ и АСС-6-5.

Композиционные материалы с полимерной матрицей отличаются от материалов на металлической основе более высокой удельной прочностью, лучшими демпфирующими характеристиками и технологичностью. В качестве матрицы широко применяются синтетические и природные органические и неорганические термопластичные и термоактивные полимеры и их смеси. В качестве армирующих элементов используются практически все разнообразие стеклянных органических, угольных, керамических, борных, металлокерамических волокон, нитей, усов, тканей. Фрикционные характеристики регулируются в широком диапазоне за счет введения в композит дисперсных веществ: графита, диселенидов, дисульфидов, дителлуридов, оксидов

металлов, полимеров, мягких металлов, масел, поверхностно-активных веществ, снижающих трение и повышающих износостойкость.

Термореактивные материалы, перерабатываемые преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, более термостойки и прочны. Порошкообразные термореактивные композиции наносят в виде тонкослойных покрытий.

Из термопластов в качестве антифрикционных материалов наиболее широко используются полиамиды (капрон, П-68, капролон и др.), обладающие низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, работающие при температуре от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Недостатком полиамидов является их относительно высокое масло- и водопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических и ударных нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью, незначительная изнашиваемость. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки 0,1—0,2, со смазкой маслом 0,05—0,1.

Для улучшения прочностных характеристик полиамиды армируют, а для повышения антифрикционных свойств — наполняют твердыми смазочными материалами. В качестве твердых смазочных материалов применяют графит, дисульфид молибдена и тальк, а в качестве армирующего наполнителя — мелконарубленное стеклянное волокно.

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных и армированных полиамидов в 1,5—4 раза меньше, коэффициент трения без смазки в 1,2—2,0 раза больше, а интенсивность изнашивания в 2—5 раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов.

Полиамиды применяют в качестве тонкослойных покрытий. Такие покрытия получают из растворов, суспензий, паст, расплавов и плакированием, а также из порошкообразных полиамидов (капрона и капролона В). Свойства покрытия зависят от его толщины, конструкции узла трения и условий эксплуатации. Толщина покрытия выбирается с учетом физико-механических свойств полимера и шероховатости контртела. Так, для капрона оптимальной считается толщина покрытия, примерно равная 0,3 мм. С уменьшением толщины покрытия снижается его демпфирующая способность, увеличиваются нагрузки. При толщине, превышающей оптимальную, коэффициент трения возрастает, уменьшается износостойкость вследствие ухудшения теплоотвода и роста тепловой напряженности в узле трения.

В машиностроении для изготовления антифрикционных деталей применяют фторопласты и композиции на их основе. Фторопласты обладают высокой химической стойкостью и высокой температу-

стойкостью (до $+300^{\circ}\text{C}$). На них оказывают влияние расплавленные щелочные металлы и их комплексы, а также треххлористый и элементарный фтор при повышенных температурах и практически не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. При температурах выше $+350^{\circ}\text{C}$ фторопласты реагируют с некоторыми металлами и окислами. Коэффициент трения многих из них, в особенности фторопласта-4, при трении по металлу очень низок: не превышает обычных коэффициентов трения смазываемых металлических пар трения.

Несмотря на низкий коэффициент трения применение фторопластов в чистом виде ограничено из-за низкой прочности и неудовлетворительных технологических характеристик. Используются в основном различные комбинации фторопластов с другими материалами. Введение различных наполнителей (кокс, графитизированный кокс, искусственный графит, дисульфид молибдена, стекловолокно, металлические порошки) в количестве 15—30% от объема позволяет значительно повысить износостойкость фторопластов. Использование фторопластов в виде лаков, паст, суспензий для изготовления антифрикционных материалов и в качестве антифрикционных наполнителей в различных композициях на основе термопластичных и термореактивных полимеров уменьшает коэффициент трения и снижает интенсивность изнашивания многих узлов трения.

В последнее время в качестве антифрикционных материалов применяют полиолефины (полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полиэтилен среднего давления, полипропилен и др.) как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями. Полиолефины стойки к действию большинства кислот, щелочей, при температуре 20°C не растворяются в органических растворителях. Однако сильные окислители — азотная кислота, хлор, фтор — их разрушают. При повышенных температурах полиолефины растворяются во многих органических растворителях.

На основе полиолефинов получают многочисленные композиции, вводя различные добавки и наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т.д.), что позволяет создавать материалы с высокой износостойкостью и коэффициентом трения 0,1—0,15.

К недостаткам полиолефинов относится низкая теплостойкость (детали трения из полиолефинов могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60°C , кратковременно — 80°C). Все это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

Для изготовления ряда машиностроительных деталей повышенной точности (шестерен, манжет, уплотнительных колец и т.д.) применяют пентапласт. Он обладает высокой химической стойкостью, малым водопоглощением. Изделия из пентапласта можно длительно

эксплуатировать при температуре 120—130° С, а кратковременно — при 135—150° С. Пентапласт перерабатывают всеми методами на оборудовании, применяемом для термопластов. Коэффициент трения при 20° С и давлении 5 МПа для пары трения пентапласт — пентапласт — 0,14, для пары пентапласт — сталь — 0,12. Чтобы улучшить физико-механические и антифрикционные свойства, в пентапласт вводят минеральные наполнители (графит, слюда, стекловолокно, окись хрома и др.).

Для изготовления ряда машиностроительных деталей (шестерен, втулок, муфт сцепления и т.д.) применяют и полиформальдегид. Он имеет высокую стойкость по отношению к органическим растворителям, к действию горячей воды, растворов солей, морской воды, щелочей, растворов органических кислот. Изделия из полиформальдегида обладают высокой жесткостью, стабильностью размеров, высокой износостойкостью, стойкостью к старению; их можно эксплуатировать при температуре до 120° С. Коэффициент трения ненаполненного формальдегида по стали без смазки 0,30—0,35. Чтобы повысить износостойкость и снизить коэффициент трения, полиформальдегид наполняют стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, сажей. Так, введение в сополимер полиформальдегида 15—20% фторопласта снижает износ в 3—4 раза и коэффициент трения — в 1,5—2 раза.

Поликарбонат находит применение в машиностроении и приборостроении, в радио- и электротехнической промышленности для изготовления деталей точных станков, приборов, вычислительных машин и т.д. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям (пригоден для использования в тропических условиях), к действию воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде растворителей (ацетон, толуол и др.) и набухает в бензине.

Поликарбонат перспективен для использования в условиях низких и сверхнизких температур, при работе в среде газообразного и жидкого азота, водорода и гелия при температурах до —253° С. Он обладает высокой ударной прочностью и стабильностью размеров изделий, малой ползучестью. Однако он плохо сопротивляется циклическим воздействиям и имеет низкую усталостную прочность.

Промышленно выпускаются поликарбонаты дифлон и наполненный 25% по массе стекловолокном дифлон СТН. Введение наполнителей повышает эксплуатационные свойства поликарбоната. Так, в результате введения в него 15—20% фторопласта в 2—3 раза снижается коэффициент трения и в 10—30 раз возрастает износостойкость. Освоено производство и так называемого антифрикционного

поликарбоната, представляющего собой дифлон, модифицированный фторопластом-4. У этого материала сохраняются высокие физико-химические, физико-механические и диэлектрические свойства поликарбоната и одновременно в 1,5—2 раза улучшаются антифрикционные свойства. Антифрикционный поликарбонат перерабатывают литьем под давлением и экструзией и применяют в узлах трения без смазки.

Полиарилаты — термопластичные полимеры, из которых литьем под давлением или литьевым прессованием изготавливают детали узлов трения. Полиарилаты отличаются высокой теплостойкостью (детали из них могут работать длительное время при температуре 160—180° С, а кратковременно — при температуре 230° С), сопротивляемостью ионизирующим излучениям, имеют хорошие диэлектрические свойства, плавятся при температуре 255—285° С, морозостойки (могут работать при температуре до —100° С), достаточно химически стойки.

Для улучшения антифрикционных свойств полиарилаты наполняют твердыми смазочными материалами.

Полиарилаты — перспективный полимерный материал.

Другими сравнительно новыми и перспективными полимерными материалами являются полиимиды. Это теплостойкие терморезистивные полимеры, применяющиеся в качестве связующего для изготовления антифрикционных композиций. На основе полиимидов выпускают композиции, наполненные дисульфидом молибдена и графитом, для которых характерна высокая радиационная и химическая стойкость.

Детали узлов трения из полиимидных композиций могут длительное время эксплуатироваться при температуре 220—260° С.

Изделия из таких композиций получают в основном компрессионным прессованием.

Разработан новый антифрикционный полиимидный композиционный материал, предназначенный для изготовления конструктивных антифрикционных деталей, подверженных значительным вибрационным нагрузкам.

Ароматические полиамиды применяют для изготовления деталей узлов трения в ненаполненном и наполненном (фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазочными материалами) виде. Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью; их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования. Выпускаемые промышленностью ароматические полиамиды под названием фенилон стойки против многих химических веществ, масел, бензина. В воде фенилон

ведет себя подобно полиаминам и может поглотить до 10% влаги, при этом размеры деталей из него увеличиваются до 2%.

5.3. Смазочные материалы

Для уменьшения трения и изнашивания узлов трения широко применяются смазочные материалы (СМ). По агрегатному состоянию СМ разделяют на жидкие, пластичные, твердые и газообразные. Наибольшее распространение в технике получили жидкие СМ — масла и пластичные СМ — смазки. Смазочные масла и смазки, являясь конструкционным элементом узла трения, кроме триботехнических функций способствуют отводу тепла от трущихся поверхностей, защищают поверхности трения и другие неизолированные части от коррозионного воздействия внешней среды, уплотняют зазоры между сопряженными деталями, удаляют из зоны трения продукты износа и прочие загрязнения.

По способу получения или происхождению выделяют нефтяные, синтетические, растительные и животные масла. В наибольших масштабах в современной технике используют масла, получаемые путем переработки нефтяного сырья (нефтяные масла). Синтетические масла, полученные на основе углеводородного или других видов сырья, и особенно растительные масла имеют ограниченное применение. Необходимость улучшения служебных свойств СМ обусловила разработку так называемых товарных масел, которые состоят из базовых масел (основ) нефтяного или синтетического происхождения (иногда их смеси), в которые вводятся специальные вещества и их композиции. В зависимости от состояния и растворимости в масле эти вещества получили разное название. Органические маслорастворимые продукты называют присадками, они составляют самую распространенную группу модификаторов (более 100 наименований) и вводятся в количестве 0,1...30%. Твердые нерастворимые вещества, как правило, неорганического происхождения, называют добавками. Их количество в масле составляет 0,5...3,0%.

По функциональному действию присадки разделяют на антиокислительные, вязкостные (загущающие), моюще-диспергирующие (детергенты), антифрикционные, противоизносные, противозадирные, противопенные, защитные (ингибиторы коррозии, антиржавейные). По химическому составу присадки представляют собой производные различных органических соединений: алкилфенолов; аминов; дициофосфорных, дитиокарбаминовых, салициловых кислот и некоторых других веществ.

В качестве добавок к маслам используют графит, дисульфид молибдена, нитрид бора, некоторые селениды, сульфиды и иодиды ме-

таллов, а также высокодисперсные порошки металлов. Основное назначение добавок — это придание СМ высокой смазочной способности. Кроме того, добавки повышают стабильность масел к окислению и улучшают их защитные свойства. Важным преимуществом твердых нерастворимых добавок является то, что их действие проявляется как при низких, так и при высоких нагрузках.

По назначению СМ подразделяют на следующие основные группы масел: моторные, промышленные, трансмиссионные, турбинные, компрессорные. Имеется также множество других СМ более узкого, специального назначения: для технологических операций, для смазывания цилиндров и осей, для амортизаторов, приборные и т.д.).

Моторные масла предназначены для смазывания карбюраторных, дизельных и авиационных поршневых двигателей внутреннего сгорания. В качестве базовых компонентов для получения моторных масел используются в основном нефтяные продукты. Для облегчения подбора моторных масел их классифицируют по вязкости и уровню эксплуатационных свойств. Существуют классификации моторных масел, принятые в СНГ, а также странах Западной Европы и США (SAE). По вязкости в СНГ согласно ГОСТ 17479—1.85 моторные масла подразделяются на 21 класс вязкости: четыре зимних, 3_3 — 6_3 ; семь летних, 6—20; десять всесезонных, $3_3/8$ — $6_3/6$. В соответствии с классификацией SAE (Society of Automotive Engineers) масла подразделяются на 10 классов вязкости: шесть зимних (0w—25w) и четыре летних (20—50) сортов.

По уровню эксплуатационных свойств в СНГ моторные масла делятся на шесть групп, три из которых в свою очередь подразделяются на две подгруппы. В одной из подгрупп регламентируются требования к маслам для карбюраторных (бензиновых) двигателей, в другой — для дизелей. В США и странах Западной Европы широко используется классификация моторных масел по API (American Petroleum Institute). Она предусматривает деление моторных масел на две категории — для карбюраторных двигателей и дизелей.

С учетом приведенной классификацией моторных масел осуществляется их маркировка. Для моторных масел, выпускаемых в СНГ, она состоит из сочетания знаков, разделенных дефисом. Первый из них обозначается буквой "М" (моторное) и не зависит от состава и свойств масла. Второй знак выражается цифрой (или группой цифр) и характеризует класс вязкости. Третий знак это буква, указывающая на уровень эксплуатационных свойств. После указанных знаков допускаются уточняющие обозначения в скобках, конкретизирующие смазочную систему.

Например, М—6₃/10—Г₂ — моторное масло, для всесезонного использования с вязкостью ~10 мм²/с при температуре — 100 °С и 10400 мм²/с при температуре — -18 °С, предназначенное для высокофорсированных дизелей.

По классификации SAE указывается класс вязкости, например, SAE 10w, SAE 40, SAE 10w/30. Дробная маркировка показывает, что при отрицательных температурах данный сорт масла отвечает требованиям, предъявляемым к зимнему маслу класса 10w, а при положительных — к маслу класса 30.

Индустриальные масла предназначены для уменьшения трения, износа и предотвращения задиrow трущихся деталей различных машин и механизмов промышленного оборудования: металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, насосов, гидросистем и т.п. Значительное различие в условиях работы этой группы СМ определяет большой их ассортимент, насчитывающий около 100 наименований. Объем производства индустриальных СМ превышает 30% общей выработки нефтяных масел.

В основу современной классификации индустриальных масел в СНГ и за рубежом положен принцип их деления на группы в зависимости от областей применения и эксплуатационных свойств. В СНГ согласно ГОСТ 17479.4—87 по назначению индустриальные масла делятся на четыре группы — Л (легконагруженные узлы), Г (гидравлические системы), Н (направляющие скольжения) и Т (тяжелонагруженные узлы). По эксплуатационным свойствам индустриальные масла разделены на пять подгрупп в зависимости от состава СМ — А, В, С, Д и Е. В зависимости от величины кинематической вязкости индустриальные масла делятся на 18 классов.

Для обозначения индустриальных масел определена группа знаков, разделенных между собой дефисом, первый из которых обозначается буквой "И" независимо от состава и свойств масел. Второй знак — прописная буква, определяющая принадлежность к группе по назначению; третий — прописная буква, указывающая на группу по эксплуатационным свойствам; четвертый — цифра, характеризующая класс кинематической вязкости. Например, И—Г—С—220 — индустриальное масло для гидросистем, условия работы которых предъявляют повышенные требования к антиокислительным, антикоррозионным и противоизносным свойствам масла, вязкостью в диапазоне 198...242 мм²/с при 40 °С.

Трансмиссионные масла используются для смазывания агрегатов трансмиссий автомобилей, тракторов, тепловозов, сельскохозяйственных, дорожных машин, судовой техники, различного рода промышленного оборудования (редукторов) и т.п. Классификация транс-

миссионных масел производится по вязкости, уровню эксплуатационных свойств и функциональному назначению.

В соответствии с классификацией, принятой в СНГ, трансмиссионные масла делятся на четыре класса по вязкости (9, 12, 18 и 34). В классификации SAE деление осуществляется на шесть классов, первые три из которых — с индексом w — являются северными. Остальные масла относятся к числу летних. Всесезонные трансмиссионные масла имеют дробную маркировку, например, SAE 80w/90.

Классификация трансмиссионных масел по эксплуатационным свойствам предусматривает деление на пять групп, каждая из которых имеет свою рекомендуемую область применения. Для определенного типа зубчатой передачи, давления в зоне зацепления и температуры масла имеется соответствующий состав присадок, различающийся по действию (противоизносные, противозадирные, многофункционального действия). По классификации API, принятой в США, трансмиссионные масла по уровню эксплуатационных свойств делятся на шесть групп (GL-1, GL-2, GL-3, GL-4, GL-5 и GL-6).

С учетом действующей классификацией трансмиссионных масел осуществляется и их маркировка. Для трансмиссионных масел, выпускаемых в СНГ, она состоит из сочетания четырех знаков, разделенных дефисом. Первая группа включает буквы "ТМ" (трансмиссионное масло); вторая — цифру, характеризующую принадлежность масла к той или иной группе по уровню эксплуатационных свойств; третья — число, означающее класс вязкости масла и определяющее сезон, в течении которого применяется СМ (зимние, летние, всесезонные). В обозначении допускается также включение поясняющих функциональное назначение буквенных индексов (рабочее, консервационное, рабочее-консервационное). Например, ТМ—5—12—РК — трансмиссионное масло для гипoidных передач, работающих с ударными нагрузками, вязкостью 11...13,9 мм²/с при 100 °С.

Трансмиссионные масла, производимые в США и странах Западной Европы, маркировка по вязкости SAE: SAE85w, SAE85w/140. Уровень эксплуатационных свойств указывается по API: GL-1, GL-2 и т.п.

Турбинные масла предназначены для смазывания узлов трения паровых, водяных и газовых турбин, турбокомпрессоров, турбонасосов, электрогенераторов. По классификации ISO 6743 для обозначения этого типа масел используется буквенный символ "Т"

Компрессорные масла применяются в различного вида компрессорах и служат для смазывания узлов трения и герметизации. В зависимости от применения компрессорные масла делятся на три основные группы по их применяемости: для воздушных и газовых компрессо-

ров; для холодильных компрессоров; для вакуумных насосов. Стандартом ISO 6743/3 этим маслам присвоен буквенный индекс "D".

Масла для технологических операций — это смазочный материал, выполняющий роль вспомогательного средства в различных технологических процессах. В эту группу входят СМ для обработки металлов резанием, пластической и тепловой обработки. Роль СМ заключается в снижении сил трения поверхностей, находящихся вблизи зоны обработки, удалении продуктов обработки, отведение тепла. Эти СМ используются при точении, фрезеровании, сверлении, развертывании, шлифовании, при вальцовке, волочении,ковки и т.д.

Пластичные смазки занимают промежуточное положение между жидкими и твердыми СМ. Эти смазки по составу представляют собой многокомпонентные коллоидные системы, содержащие дисперсионную среду — жидкую основу (70—90%), дисперсную фазу (10—15%), модификаторы структуры, обеспечивающие формирование структуры смазки (0,1—2%) и, как правило, добавки и присадки (1—15%), предназначенные для улучшения эксплуатационных свойств. Принципиальное отличие пластичных смазок от жидких масел связано с присутствием в смазках загустителя и определяется:

1. наличием предела прочности, вследствие чего смазки в состоянии покоя не текут и приобретают способность течь только при определенных условиях;

2. способностью смазок восстанавливать свою структуру и свойства после снятия нагрузки, вызвавшей ее разрушение;

3. аномальным внутренним трением, в связи с чем вязкость смазок зависит не только от температуры, но и от механических параметров, при которых происходит течение.

В качестве загустителей используются мыла, твердые углеводороды, ряд продуктов неорганического происхождения. Их функциональное назначение состоит в загущении масла, придания системе прочности. Пластичные смазки используются в узлах трения, в которых невозможно и нецелесообразно использовать циркуляционную смазочную систему. Кроме того, эти смазки эффективны в трибосопряжениях, работающих при высоких контактных нагрузках, малых скоростях, при частом изменении направления движения, а также в открытых и негерметизированных узлах.

Специфика состояния и свойств определяют назначение и область применения пластичных смазок в качестве антифрикционных, консервационных и уплотнительных СМ. Кроме выполнения основных функций, пластичные смазки защищают детали узлов трения от ударных нагрузок, снижают вибрацию и шум, уплотняют зазоры между сопряженными деталями.

С целью упорядочения наименований и обозначений пластичных смазок в странах СНГ введен в действие ГОСТ 23258—78, согласно которому каждая смазка получает наименование (название), состоящее из одного слова (литол, орион, графитол и т.д.) и индексное (буквенно-цифровое) обозначение, в краткой форме информирующее о назначении, составе, основных характеристиках смазки.

Первая буква в индексе указывает область применения смазки: С — общего назначения до 70 °С; И — общего назначения до 110 °С; И — противозадирная; М — многоцелевая; Т — редукторная и т.д.

Второй буквенный индекс соответствует типу загустителя: мыла, алюминиевое — Ал; бариевое — Ба; кальциевое — Ка; литивое — Ли и т.д. После двух буквенных индексов указывается в виде дроби рекомендуемый температурный интервал применения смазки: в числителе (без знака минус) минимальную, а в знаменателе — максимальную температуру, уменьшенную в 10 раз. Например, индекс 3/13 соответствует температурному интервалу применения от — 30 до 130 °С. За минимальную температуру применения принимают ту, при которой динамическая вязкость антифрикционной смазки, определенная по ГОСТ 7163—63, составляет 2000 Па·с.

Тип дисперсионной среды и твердых добавок обозначают четвертым индексом в виде строчной буквы: нефтяное масло — н; синтетические углеводороды — у; кремнийорганические жидкости — к; сложные эфиры — э; графит — г; дисульфид молибдена — д; прочие добавки — т и т.д.

На последнем пятом месте помещают цифровой индекс, означающий класс консистенции смазки от 00 до 7 (всего 9), что соответствует пенетрации смазки в интервале 400—70, проведенной при 25 °С по ГОСТ 5346—78*.

Примеры индексных обозначений смазок С Ка 2/7—2: С — относится к группе смазок общего назначения, работающих при температурах до 70 °С; Ка — загущена кальциевым мылом; *рекомендуется для применения при температурах от —20 до 70 °С (вязкость масла при —20 °С близка к 2000 Па·с); отсутствие индекса дисперсионной среды означает, что смазка приготовлена на нефтяном масле; по консистенции она относится ко 2 классу (пенетрация при 25 °С составляет 265—295).

* Таблица классов консистенции и порядок определения пенетрации приведена в лабораторной работе № 8?

Твердые смазочные материалы — используются в ряде объектов техники, условия работы которых исключают возможность использования в трибосопряжениях газообразных, жидких и пластичных СМ. К этим условиям относятся низкие температуры (ниже температуры застывания масел и смазок), высокие (порядка 400 °С и выше), недопустимость по технологическому процессу присутствия жидкой среды, глубокий вакуум, воздействие ионизирующих излучений, недоступность поверхностей трения для периодического подвода к ним смазочного материала и др.

По механизму действия твердые смазки можно разделить на две группы. Смазки первой группы модифицируют химические поверхности трения. Непрерывно образующееся на поверхности трения в результате триботехнических реакций пленки уменьшают коэффициент трения, износ, предотвращают схватывание контактирующих деталей. К твердым смазкам указанного типа, прежде всего, следует отнести иодистые соединения металлов PbI_2 , CdI_2 , BiI_2 , а также ряд других химически активных соединений, например, фосфаты, хлориды и некоторые окислители.

Смазки второй группы, как правило, не взаимодействуют химически с поверхностями трения. Смазки этой группы можно разделить на две подгруппы:

неорганические, слоистые — диалкогениды металлов, графит, торированный графит, нитрид бора и др.;

органические полимерные материалы — политетрафторэтилен, полиамиды, полиэтилен и др.

Твердосмазочные материалы применяются в качестве покрытий конструкционных материалов, антифрикционных наполнителей в композиционных материалах, истираемого компонента при ротационном способе смазки.

Глава 6 ТРИБОМЕТРИЯ И ТРИБОИНФОРМАТИКА

При проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте машин, содержащих узлы трения, возникает необходимость использования информации о триботехнических свойствах машиностроительных материалов, как правило, получаемых с помощью трибометрии. Объективная оценка триботехнических свойств материалов, необходимая для управления долговечностью безотказностью машин, может быть получена путем расчета и испытаний. Однако, существующие в настоящее время методы расчета не доведены до уровня, обеспечивающего возможность их практического применения для всего многообразия сложных по своей природе процессов трения, изнашивания и смазки. Вот почему основной источник получения триботехнических свойств является трибометрия. Трибометрия включает методы и средства измерения основных параметров фрикционного контакта (сила трения, износ, температура, шероховатость, контурная и фактическая площади контакта, контактная деформация). Актуальной проблемой становится также развитие трибоинформатики, занимающейся хранением и использованием, полученной методами трибометрии информации о триботехнических свойствах материалов в виде банков данных на базе стандартизованных методов и средств испытаний. Особый интерес представляет опыт создания сети банков данных по материалам, в том числе триботехнического назначения на базе широкого применения ЭВМ.

6.1. Методы оценки триботехнических свойств материалов и узлов трения

В общем случае трибометрические исследования представляют собой оценку фрикционных характеристик, проводимую в несколько ступеней:

1. на лабораторных машинах трения с испытуемыми образцами простой геометрической формы (плоскости, цилиндры, сферы);
2. на стендах или имитирующих машинах с образцами в виде серийных деталей машин или специально изготовленными аналогичными деталями (зубчатые колеса, детали поршневой группы двигателя внутреннего сгорания, подшипники качения или скольжения и др.);
3. непосредственно в реальных узлах машин и механизмов в условиях эксплуатации. При испытаниях на машинах в условиях экс-

плутации на получаемые результаты помимо основных параметров (относительной скорости движения трущихся поверхностей, давления, температуры), оказывают влияния условия работы машины (наличие остановок и пусков, переменность нагрузки и скорости, наличие влаги и других коррозионных агентов, а также абразивных частиц в окружающей среде и др.) В этих условиях трудно выделить наиболее важный параметр, оказывающий определяющее влияние на фрикционное поведение узла трения. Для уменьшения этих влияний испытания должны быть достаточно длительными и проводится параллельно на нескольких однотипных машинах, на что требуется много времени и средств. Поэтому в большинстве случаев эксплуатационные испытания применяются для окончательной проверки оптимального сочетания контактирующих материалов, отобранных в результате серии лабораторных и стендовых испытаний.

Стендовые испытания на имитирующих машинах позволяют определять трибологические характеристики материалов в условиях трения реальных деталей машин и механизмов при контроле всех влияющих параметров. Испытания на имитирующих машинах также длительны и дорогостоящи и применяются в основном для выявления влияния конструктивных факторов на фрикционные характеристики материалов, образующих пару трения.

В отличие от испытаний триботехнических материалов в условиях эксплуатации и на стендах, лабораторные испытания не требуют больших затрат времени, они в большей мере позволяют изменять условия на поверхности трения и выделять основной параметр, оказывающий влияние на трибологическое поведение триботехнических материалов. Условия испытания на лабораторных машинах трения отличаются от действительных условий работы материалов в реальных машинах, однако преимущества лабораторных испытаний способствуют их широкому применению, особенно для разработки новых материалов (контроль нагрузки, скорости, температуры, возможность измерения силы трения, износа, малое количество исследуемого материала).

Результаты лабораторных испытаний могут быть условной мерой износостойкости данной трибологической системы, выполненной из исследуемых материалов, в будущих конкретных условиях работы машины и мерой коэффициента полезного действия.

При разработке методики лабораторных испытаний следует учитывать, что триботехнические свойства формируются как сумма факторов, определяемых начальной структурой материалов, применяемых при испытаниях режимов фрикционного нагружения и качеств а приработочных процессов. Поэтому в трибологии, как и в науке об

объемном напряженном состоянии и прочности, отсутствуют инвариантные т.е. не зависящие от методов и режимов их определения показатели.

С точки зрения цели исследований различают два типа исследовательских программ:

- исследование трения и износа в произвольно задаваемых условиях (например, в вакууме, в атмосфере инертных газов, при повышенной или пониженной температуре). Эта программа позволяет проводить фундаментальные исследования на образцах, в том числе и касающиеся физических законов трения и износа материалов. При этом можно определять влияние отдельных факторов на сопротивление трению, интенсивность изнашивания материалов и смазок для отдельных трущихся элементов машин;

- проведение испытаний при достаточно жесткой регламентации режимов испытаний т.е. применение стандартных методов испытаний. Испытания по стандартным методикам позволяют получать при сравнительных испытаниях ряды по тем или иным показателям, которые соответствуют аналогичным рядам в натуральных, эксплуатационных условиях.

В настоящее время мировой опыт исследования лабораторных методов испытаний насчитывает сотни методик фрикционных испытаний стандартизованных в рамках национальных и международного (ISO) комитетов. Как правило, стандартизованные методы испытаний ориентированы на испытания конкретных материалов триботехнического назначения применительно к условиям возможного их применения.

В бывшем СССР, например, было разработано 50 таких стандартов, ГОСТов (см. Приложение 1).

6.2. Машины для испытаний на трение и износ

Применительно к каждому стандартизованному методу испытаний разработано соответствующее испытательное оборудование (машина трения — трибометр).

Структурная схема лабораторных машин трения включает в себя ряд функциональных узлов.

Держатель образцов испытываемых материалов 1 (рис. 6.1) является основным узлом и предназначен для формирования испытываемой пары трения. Он должен обеспечивать точную и надежную установку образцов, однозначность и определенность в реализации расчетной схемы испытаний, включая равномерность нагрузки и износа образцов за счет их самоустанавливаемости или других мер. Соединения держателей образцов не должны иметь люфтов. Держатель образ-

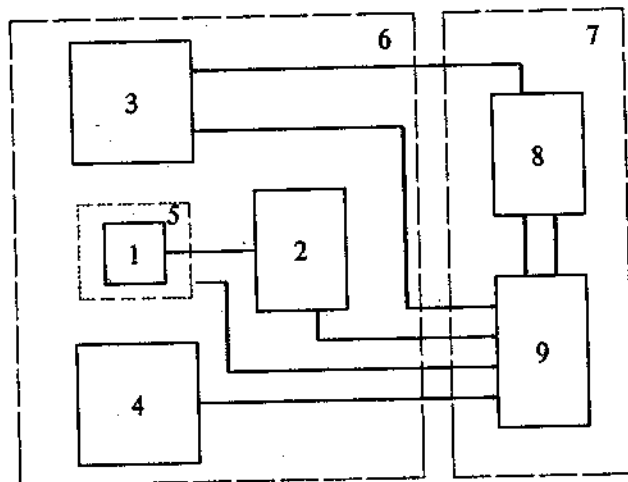


Рис. 6.1. Структурная схема машины трения

цов конструктивно связан с блоком датчиков 2, позволяющих производить измерение силы (момента) трения, износа, температуры фрикционного контакта, пути трения и т. д..

Привод 3 предназначен для сообщения движения одному или нескольким образцам, входящим в узел трения. Привод включает в себя электродвигатель, регулятор скорости и передаточный механизм, кинематика которого определяется характером относительного движения трущейся пары. Привод должен обеспечивать плавность движения без рывков и ударов, если последние не предусмотрены методом испытаний.

Узел нагружения 4 предназначен для создания нормальной постоянной или переменной нагрузки на образцы. Для этой цели, как правило, используются рычажно-гравитационные, пружинные, пневматические и другие механизмы. При этом должны обеспечиваться плавное приложение и стабильность режима нагружения независимо от изменения в процессе испытания силы трения и величины износа образцов.

Камера 5 служит для проведения испытаний в специальных условиях (температурных, в вакууме, газовых средах, при подаче смазочного материала, абразива и т.д.). Параллельно она выполняет защитную функцию, ограждая оператора от воздействия продуктов изнашивания, шума и других вредных факторов.

Указанные узлы монтируются на общей станине и представляют собой испытательный блок 6. Конструкция испытательного блока дол-

жна обеспечивать надежную виброизоляцию машины, работающей в условиях интенсивных динамических нагрузок, в том числе путем установки на изолированный фундамент.

Испытательный блок электрически связан с пультом управления 7, содержащим блоки управления 8 и измерения 9. Однако, в некоторых случаях пульт управления размещается в испытательном блоке, т.е. специальный пульт отсутствует.

Дополнительно машина трения может содержать аппаратуру для измерения сопутствующих трению процессов, несущих важную информацию о механизмах фрикционного взаимодействия. Для современной трибологии наиболее характерно стремление к определению параметров непосредственно в процессе фрикционного взаимодействия, к повышению точности и одновременной оценке максимально возможного количества параметров. Такой подход обуславливает объединение машин трения с физическими приборами типа электронных микроскопов, измерителей электронного парамагнитного резонанса, масс-спектрометров и т. д., что позволяет находить взаимосвязи между строением материала и его трибологическими характеристиками.

С целью повышения производительности испытаний и их достоверности в практике все чаще используется микропроцессорная и вычислительная техника как для обработки данных трибологического эксперимента, так и для управления режимом испытаний.

Важной конструктивной характеристикой машин для измерения величины коэффициента трения и интенсивности изнашивания является макрогеометрия контакта исследуемых образцов и деталей. Наиболее часто встречается следующая макрогеометрия трибологического контакта:

- выпуклая поверхность с плоской поверхностью (цилиндр с плоской поверхностью, шар с плоской поверхностью);
- плоская поверхность с плоской поверхностью;
- выпуклая поверхность с выпуклой или вогнутой поверхностью (цилиндр с цилиндром, причем оба цилиндра могут иметь положительную кривизну либо один — положительную, другой — отрицательную; шар с шаром, причем оба шара могут иметь положительную кривизну либо один — положительную, другой — отрицательную; конус с цилиндром и т.д.).

Оси взаимодействующих образца и контробразца могут быть параллельными или перекрещивающимися.

Приведенная классификация обоснована только теоретически, так как в реальных условиях работы пары трения из-за упругих или даже пластической деформаций деталей, по существу, всегда осуще-

ствляется поверхностный контакт. Отвод теплоты от трущихся поверхностей испытуемых образцов значительно влияет на трение и износ. Поэтому в машинах для исследования трения и износа применяются следующие способы принудительного отвода теплоты:

- отвод теплоты от трущихся поверхностей охлаждающей жидкостью, омывающей зоны трения;
- отвод теплоты от трущихся поверхностей охлаждающей жидкостью, протекающей внутри образца или контробразца, но не омывающей трущиеся поверхности.

По кинематическому признаку все машины можно разделить на два класса (табл. 6.1): I — установки однонаправленного относительного перемещения; II - знакопеременного относительного перемещения (возвратно-поступательное или возвратно-вращательное).

Внутри каждого класса установки разделяются на две группы: 1 — машины торцевого трения; 2 — машины трения с контактом по об-

Таблица 6.1. Классификация машин трения по кинематическому признаку

Коэффициент взаимного перекрытия ($K_{вз}$)	Относительное перемещение			
	Однонаправленное (I)		Знакопеременное (II)	
	торцовое трение	трение по образующей	торцовое трение	трение по образующей
$0,5 < K_{вз} < 0,5$	а	б	в	г
$0 < K_{вз} < 0,5$	д	е	ж	з

Таблица 6.2. Серийные отечественные машины трения

Тип	Назначение (методы испытаний)
	Универсальные
2070 СМТ-1 (ИИ-5019)	Моделирование фрикционных сопряжений с высшими кинематическими парами: зубчатые колеса, колесо-рельс, подшипники качения (нестандартные, МР74—82)
УМЪ-1, 2168УМТ "УНИТРИБ"	Исследование трения и износа материалов при $K_{вз} = 0$ применительно к тяжело нагруженным сопряжениям (ГОСТ 23.210—80, РД 50-662—88 и нестандартные)
	Целевого назначения
2052 МТИ-1	Дисковые машины малой мощности для испытания резин (ГОСТ 426—77)
2101 ТП	(ГОСТ 11629—75)
2152 ПТС	(ГОСТ 12251—77 и нестандартные)
ТИ-1М	Испытание тканей и трикотажных полотен на стойкость к истиранию (ГОСТ 12739—85)

разующей. В свою очередь внутри каждой группы разделяют две подгруппы по коэффициенту взаимного перекрытия.

В странах СНГ выпускают ряд машин трения, назначение которых приведено в таблице 6.2. Испытательные машины позволяют производить оценку влияния физико-механических свойств и режимов трения на фрикционные свойства материалов как в условиях протяженного, так и сосредоточенного контакта.

Конкретные примеры лабораторных машин трения рассмотрены в лабораторном практикуме.

6.3. Методы и средства организации информации в области трибологии

Большое количество (более 100 тыс. наименований), продолжающее все увеличиваться, видов триботехнических материалов превращает выбор оптимального сочетания материалов пары трения в трудно решаемую задачу. Имеющиеся в научно-технической литературе сведения разрознены и зачастую трудно сопоставимы. Большое значение, как уже отмечалось выше, приобретает организация автоматизированных баз данных (БД) в области трибологии, позволяющих осуществлять поиск информации по всем ее разделам.

Опыт создания БД за рубежом и в странах СНГ показывает, что все проблемы трибологии невозможно охватить одной БД — требуется система БД. Развитие БД идет по нескольким направлениям:

- базы библиографических данных, которые содержат сведения об авторах, названии, месте, и времени публикации;
- базы данных источников, содержит полный текст статьи или другого материала;
- базы данных ссылок помогают найти источник информации;
- базы данных по триботехническим и физико-механическим свойствам материалов. В настоящее время за рубежом насчитывается около тридцати баз данных, имеющих отношение к трибологии.

В ФРГ в Федеральном институте испытания материалов (Bundesanstalt für Materialprüfung) создана специализированная база данных "TRIBO". Данная БД является уникальной по части систематизации и классификации публикаций с трибологической точки зрения. К примеру, основные разделы, по которым классифицируются источники информации, включают:

- поверхностные характеристики и их измерения, физико-химия поверхности, анализ поверхности, механика контакта, адгезия, обработка поверхности и нанесение покрытий;
- факторы, влияющие на измерения и обработку (характеристика материала, особенности конструкции, условия работы);

- надежность и эксплуатация;
- методы испытаний и измерения. Эта база данных ежегодно пополняется примерно 5000-6000 источниками.

Первая в США компьютеризированная система по трибологии ACTIS (Computerized Tribology Information Systems) является результатом совместных усилий правительства, промышленности и науки и обеспечивает инженеров высококачественной информацией по трибоматериаловедению. Организаторами этого проекта были как правительственные организации: одна из лабораторий ВВС США, исследовательский центр ВВС США, департаменты энергии и торговли, национальный научный фонд, так и неправительственные организации: общество трибологов и специалистов по смазке, американское общество инженеров-механиков. Проект ACTIS не ограничивается только сбором трибологической информации. Система обладает экспертными возможностями, и некоторые модули позволяют произвести инженерные расчеты с применением выбранных материалов. Например, модуль CONTACT позволяет рассчитать деформацию в контакте двух тел при нормальной и тангенциальной нагрузках. Модуль GEAR поможет инженерам в разработке клиноременных и планетарных зубчатых передач и т.д.

В бывшем СССР первые попытки создания банков данных по трибологии были предприняты во ФТИНТ (Харьков), ИММС АНБ (Гомель) и НПО НИИ тракторсельхозмаше (Москва). Опыт работы по накоплению экспериментальных данных при стандартных триботехнических испытаниях показал, что наиболее предпочтительным для организации хранения и поиска информации о свойствах того или иного материала является использование автоматизированных информационно-поисковых систем (АИПС) документально-фактографического типа, работающих в реальном масштабе времени.

Диалоговые АИПС обладают максимальным быстродействием, исключают посредничество обслуживающего персонала в диалоге потребителя информации с ЭВМ, облегчают произвольный просмотр информационного массива и дистанционный доступ к БД, повышают экономичность в использовании ЭВМ. С помощью таких АИПС легче преодолевается несовместимость по информационному, лингвистическому, техническому и математическому аспектам путем стандартизации информационной базы, языка, математического обеспечения и технических средств.

В последнее время было начато создание единой информационной системы SOVTRIBO, ориентированной на использование систем управления базами данных (СУБД). В связи с образованием СНГ общее руководство работами в этом направлении отсутствует, хотя в ря-

де научных центров идет процесс создания локальных БД. Это требует от разработчиков использования таких аппаратных и программных средств, которые обеспечивали бы возможность объединения отдельных систем и обмена частям и баз данных.

Большинство СУБД для персональных компьютеров (ПК) ориентировано на реляционные базы данных, которые представляют собой набор взаимосвязанных отношений (таблиц), находящихся в ПК в виде файла. Наиболее развитые СУБД для ПЭВМ имеют следующие характерные особенности:

- "дружественный" интерфейс с пользователем;
- встроенная программа интерактивной помощи, а иногда и наличие интерактивной обучающей программы;
- средства автоматизированного создания, использования и модификации базы данных без необходимости программирования, генераторы программ, отчетов, форматов;
- развитые языки программирования баз данных — более 200 команд и функций. Среди многообразия СУБД для ПК следует выделить следующие:

- dBase III Plus и dBase VI фирмы Ashton-Tate;
- R:Base фирмы Microrim;
- Reflex фирмы Borland International;
- Paradox фирмы Ansa Software;
- Knowledgeman фирмы Micro Data Base System Inc. и т.д.

Наибольшее распространение в странах СНГ и за рубежом получила СУБД dBase III Plus. Она функционирует на любом ПК типа IBM PC XT/AT в среде операционной системы PC/MS-DOS версии 2.0 и выше. Появились версии, совместимые с СУБД dBase III Plus, такие, как:

- FoxBase Plus фирмы Fox Software Inc.;
- Clipper фирмы Nantucket Corporation;
- QuickSilver и др.

Структура БД SOVTRIBO включает в себя корневую часть TRIBSTR, в которую заносятся условия проведения испытаний, конструктивные особенности узлов трения, применяемые материалы и среды, средние значения триботехнических параметров, критические точки и подбаза данных SUBGOM, в которой содержатся более подробные сведения о поведении материалов при заданных условиях.

Данные в подбазе — это результаты экспериментов при описанных в корневой структуре параметрах. Подбаза данных SUBGOM реализована таким образом, что каждая экспериментальная точка, представляющая набор данных, характеризующих трибологическое поведение материала: коэффициент износа (K), коэффициент трения

Таблица 6.3. Структура подбазы данных COMPOSIT

Содержание поля и его имя в подбазе	Примеры принимаемых значений
Номер опыта. Поле (NUMINMAIN), значение которого совпадает с содержанием поля (SUBASENUM) основной базы и служит для интерфейса между подбазой и основной базой	10
Номер экспериментальной точки в текущем эксперименте (NUMPOINT)	3
Значение нагрузки (LOAD)	2,5
Значение скорости (SPEED)	0,5
Значение коэффициента износа (WEAR)	2,8
Значение коэффициента трения (FRICTION)	0,5
Значение температуры (TEMPERATUR)	458

(f), температура (T) при заданных условиях — скорости (v) и давлении (p), описывается вектором из семи элементов. Фактически каждый эксперимент описывается пятью координатами в пространстве измеряемых величин — p, v, T, K, f (табл. 6.3).

БД SUBGOM реализована на ПК типа IBM PC AT с использованием системы управления базами данных реляционного типа Clipreg. БД SUBGOM содержит сведения о триботехнических свойствах антифрикционных материалов и композитов на их основе, разработанных в различных научных центрах страны и прошедших аттестацию в трибоцентре ИММС АНБ по методике, утвержденной Госстандартом СССР.

В БД используется табличная и графическая форма представления данных. Таблица значений свойств (коэффициенты трения, износа, температура трения), являясь универсальной формой выходных документов системы, обладает компактностью и трансформируемостью. Система позволяет реализовать ответы на запросы, которые можно объединить в три основные группы:

- прямые запросы типа: привести конкретные свойства материалов (или нескольких материалов);
- инверсные запросы типа: найти материалы, обладающие заданным свойством в определенном диапазоне значений;
- запрос на выбор материала по комплексу свойств: найти материал, удовлетворяющий нескольким свойствам одновременно. Поиск материалов организован посредством диалога пользователя с системой.

Глава 7 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Перед проведением лабораторных работ, содержащихся в настоящем практикуме, необходимо ознакомиться с соответствующими разделами теории трибологии и принципом действия используемого оборудования.

После составления в отдельном журнале предварительного отчета, содержащего краткое описание используемого оборудования, таблицы, необходимо получить допуск по технике безопасности при работе с экспериментальным оборудованием.

Окончательный отчет по проведенной лабораторной работе должен содержать ответы на все вопросы согласно заданию.

Рисунки, схемы, графики выполняются с соблюдением требований стандартов на оформление технической документации.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЩУПОВЫМ МЕТОДОМ

Цель работы Изучение устройства и работы профилографа-профилометра; приобретение навыков записи профиля микронеровностей поверхности; освоение методики расчета стандартных параметров шероховатости по профилограмме.

Общие сведения

Профилограф-профилометр (П-П) относится к группе приборов, которые определяют параметры шероховатости методом непосредственного контакта с измеряемой поверхностью по системе "М"*. Принцип действия прибора состоит в ощупывании исследуемой по-

* Система "М" — система отсчета, в которой в качестве базовой линии выбрана средняя линия профиля.

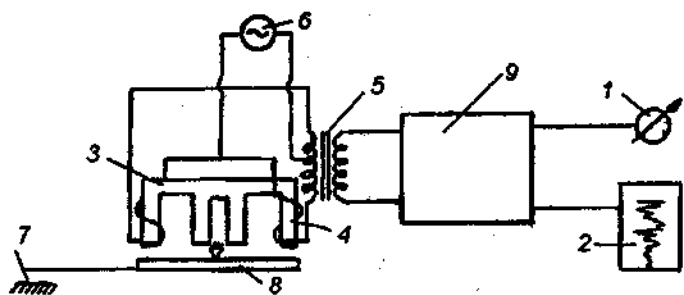


Рис. 7.1.1. Блок-схема профилографа-профилометра

верхности алмазной иглой с радиусом закругления 10 мкм и преобразования колебаний иглы в изменения напряжения индуктивным методом. Как следует из названия прибор может работать в двух режимах как профилометр и как профилограф.

Наибольшее распространение в странах СНГ получили ряд моделей П-П выпускаемых московским заводом "Калибр". На рис. 7.1.1 представлена общая для всех моделей П-П блок-схема, которая включает в себя индуктивный датчик, электронный блок с показывающим прибором 1 и записывающий прибор 2. Индуктивный датчик, далее просто датчик, состоит из двоянного Ш-образного сердечника 3 с двумя катушками 4. Катушка датчика и две половины первичной обмотки дифференциального входного трансформатора 5 образуют балансный мост, питание которого осуществляется от генератора звуковой частоты 6. При перемещении датчика посредством мотопривода относительно исследуемой поверхности алмазная игла 7, ощупывая неровности поверхности совершает колебания. Жестко связанный с иглой якорь 8 с такой же частотой и амплитудой изменяет воздушный зазор с сердечником и тем самым вызывает пропорциональные изменения напряжения на выходе дифференциального трансформатора. Полученные изменения напряжения усиливаются электронным блоком 9, на выход которого подключается прибор записывающий профилограмму 2 или прибор 1, показывающий значение параметра шероховатости R_a .

Профилограмма представляет собой графическое изображение профиля изучаемой поверхности детали. В настоящее время по профилограмме рассчитывается более 20 параметров, используемых для решения различных триботехнических задач.

ГОСТ 2789—73 регламентирует оценку шероховатости следующими параметрами:

R_a — средним арифметическим отклонением профиля, мкм;

- R_q — средним квадратическим отклонением профиля, мкм;
- R_z — высотой неровностей профиля по десяти точкам, мкм;
- R_{max} — наибольшей высотой неровностей профиля, мкм;
- S_m — средним шагом неровностей, мм;
- S — средним шагом неровностей, по вершинам, мм;
- t_p — относительной опорной длиной профиля.

Оборудование и принадлежности

Профилограф-профилометр модели 201, образцы шероховатости.

Устройство и работа профилографа-профилометра модели 201

П-П модели 201 состоит из шести самостоятельно выполненных частей (рис. 7.1.2):

- стойки 1;
- универсального столика 2;
- датчика 3;
- мотопривода 4;
- электронного блока 5;
- записывающего прибора 6.

Стойка состоит из основания, на котором крепится универсальный столик и собственно стойки с кареткой, на которой установлен мотопривод с датчиком. В основании имеется диск 7, поворачивая который можно наклонять столик для установки измеряемой поверхности

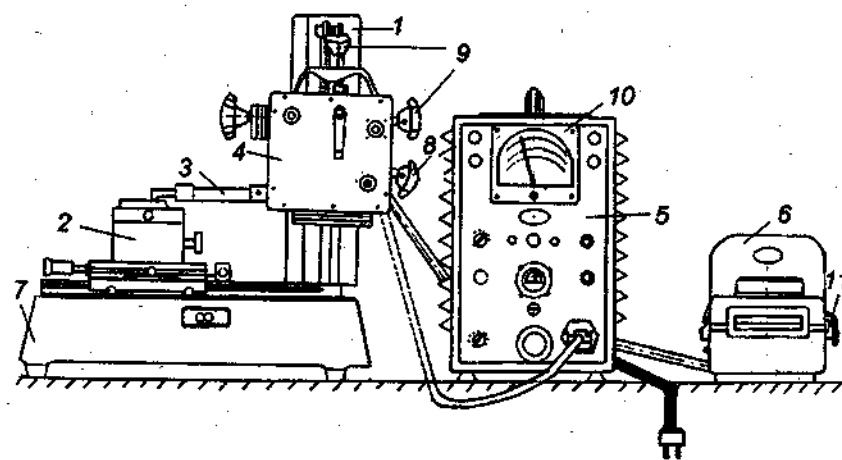


Рис. 7.1.2. Профилограф-профилометр модели 201

сти параллельно траектории движения датчика. Каретка имеет фиксатор 8 и два маховика для ускоренной и точной установки датчика в рабочее положение 9.

Универсальный столик предназначен для установки измеряемых деталей. Он позволяет производить перемещения детали в двух взаимноперпендикулярных направлениях и осуществлять поворот.

Мотопривод осуществляет перемещение датчика слева направо с четырьмя различными скоростями: 0,205; 1,03; 10,3 и 41,7 мм/мин. В зависимости от вида работы прибора в режиме профилографа или профилометра величина хода датчика составляет для профилометра — до 10...12 мм, для профилографа до 40 мм. Включение перемещения датчика производится установкой указанных параметров переключателями расположенными на блоке мотопривода. Кроме того блок имеет переключатель длины трассы интегрирования при работе в режиме профилометра и смотровое окно с указателем положения датчика относительно измеряемой детали.

Датчик конструктивно выполнен в виде цилиндра один конец которого жестко связан со штоком мотопривода, а на втором размещаются сменные опоры в зависимости от величины шага неровностей. Внутри датчика установлена алмазная игла, свободно перемещающаяся в вертикальной плоскости и жестко связанная с корпусом магнитной системы. Усилие нажатие иглы на измеряемую поверхность не превышает 0,1 сН, что тем не менее при радиусе закругления ее головки в 10 мкм вызывает давление 3 МПа. Это обуславливает установление нижней границы, твердости материалов (10 НВ), шероховатость которых можно измерять шуповым методом. Градиент усилия иглы составляет не более 0,0005 сН/мкм.

Сменная опора обеспечивает измерение отклонения профиля от базовой поверхности — линии вершин измеряемой поверхности детали. Усилие воздействия опоры на испытуемую поверхность не более 50 сН.

Электронный блок предназначен для питания катушек индуктивного датчика, усиления поступающего с датчика сигнала и подачи его на интегратор или записывающий прибор. В режиме работы профилометра сигнал с интегратора подается на показывающий прибор, измеряющий среднее арифметическое отклонение профиля, R_a в мкм. При работе П—П как профилографа усиленный сигнал поступает на записывающий прибор. Прибор позволяет получать вертикальное увеличение от $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$.

На передней панели электронного блока расположен показывающий прибор 10, органы управления и настройки работы П—П.

Записывающий прибор представляет собой самопишущий магнитоэлектрический миллиамперметр постоянного тока и служит для записи микронеровностей испытуемой поверхности. Запись производится электротермическим способом на электротермической диаграммной бумаге шириной 80 мм.

Диаграммная бумага перемещается с 6-ю различными скоростями — 20, 40, 80, 200, 400, 800 мм/мин, что в сочетании со скоростями трассирования или перемещения датчика обеспечивает горизонтальное увеличение от 2 до 4000. Переключение скоростей осуществляется маховиком 11 на боковой поверхности записывающего прибора.

Порядок проведения измерений.

Запись профиля микронеровностей поверхности

1. Ознакомьтесь с устройством и работой П—П модели 201.
2. Включите прибор в сеть и прогрейте его в течении 10 минут.
3. Установите образец или измеряемую деталь на универсальный столик.
4. Переключатель “трасса” установите в положение “ЗП” — записывающий прибор.
5. Поворотом рычага на мотоприводе влево переведите датчик в левое положение на необходимое расстояние по указателю в смотровом окне.
6. Установите датчик на измеряемую поверхность и включите требуемое вертикальное увеличение от 1 до 200 тысяч.
7. Поворотом переключателя “Скорость датчика (мм/мин)” установите скорость трассирования датчика 0,2 мм/мин для вертикальных увеличений 200, 100, 40 тысяч или 1 мм/мин для 20, 10, 2 и 1 тысячи.
8. Вращением маховика, расположенного на боковой поверхности записывающего прибора установите необходимую скорость перемещения бумаги в зависимости от требуемого горизонтального увеличения (см. табл. 7.1.1).

Таблица 7.1.1

Скорость датчика мм/мин	Скорость движения бумаги записывающего прибора мм/мин					
	20	40	80	200	400	800
	Горизонтальное увеличение					
0,2	100	200	400	1000	2000	4000
1,0	20	40	80	200	400	800
10	2	4	8	20	40	80

9. Переключатель “Вид работы” на электронном блоке установите в положение “ЗП” — записывающий прибор. При значительном отклонении пера записывающего прибора от середины бумажной ленты, остановив каретку, вращением центрального маховика точной установки и потенциометра “Установка пера З.П.” на электронном блоке установите их в необходимое положение. После этого зафиксируйте положение каретки с мотоприводом на стойке.

10. Включите движение бумаги, поставив переключатель записывающего прибора в положение “Включено”.

11. Включите движение датчика, отведя рычаг мотопривода вправо до упора. Следите, чтобы при записи профилограммы стрелка не выходила за границы бумажной ленты, в противном случае следует провести установку параллельности движения датчика относительно измеряемой поверхности маховиком узла нивелировки или уменьшить вертикальное увеличение.

12. После прохождения датчиком выбранного участка поверхности детали отключите движение бумаги.

13. Переключатель вида работ переведите в положение “Загр”.

14. Поднимите каретку с мотоприводом, для снятия образца.

15. Отключите питание прибора от электросети.

Расчет стандартных параметров шероховатости по профилограмме

Порядок расчета

1. Рассчитать координаты и провести среднюю линию полученной профилограммы.

2. Последовательно рассчитать стандартные параметры шероховатости.

3. Построить опорную кривую.

4. По опорной кривой определить коэффициенты b и v уравнения аппроксимирующего начальный участок опорной кривой.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.

2. Краткое описание и общий вид профилографа модели 201.

3. Порядок записи профилограммы поверхности детали.

4. Расчет по полученной профилограмме основных параметров шероховатости поверхности.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен профилограф?
2. В чем заключается принцип действия профилографа?
3. Какова последовательность определения параметров шероховатости?
4. По каким формулам определяются параметры шероховатости?

Рекомендуемая литература

[9], [10], [70], [79], [108], [117], [119], [215], ГОСТ 2789—73, ГОСТ 19299—73, ГОСТ 2.309—73.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО АРИФМЕТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПРОФИЛЯ R_a НА ПРОФИЛОМЕТРЕ МОДЕЛИ 296

Цель работы Изучение устройства и приобретение навыков работы на профилометре. Определение среднего арифметического отклонения профиля R_a поверхности деталей машин.

Общие сведения

Действие профилометра основано на принципе ощупывания неровностей поверхности алмазной иглой и преобразования возникающих при этом механических колебаний иглы в изменение напряжения электрического сигнала, который после интегрирования представляется в виде параметра шероховатости R_a .

Основными составными частями профилометра (рис. 7.2.1) являются: 1 — привод; 2 — блок электронный; 3 — стойка; 4 — датчик; 5 — шланг соединительный; 6 — призма.

Рабочий и обратный ход перемещения датчика по измеряемой поверхности осуществляется с помощью привода, который в зависи-

мости от габаритов детали устанавливается на кронштейне стойки или непосредственно на измеряемую поверхность. В приводе применяется двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Для обеспечения требуемой скорости он оснащен системой астатической стабилизации.

Стойка предназначена для установки привода и базирования малогабаритных деталей. Стойка состоит из плиты, колонны, каретки и кронштейна. Привод устанавливается на кронштейн, где закрепляется винтами. В плите стойки имеется паз, служащий для установки универсального столика, на который устанавливаются малогабаритные детали.

Электронный блок выполнен в настольном варианте. Все функциональные узлы выполнены на печатных платах и соединены в электрическую схему с помощью жгута и разъемов. На лицевой панели блока расположены органы управления, которые с соответствующими надписями по месту их расположения включают: цифровое табло для отсчета измеренного значения 7; индикатор рабочей зоны 8; кнопка отключения сети 9; кнопка включения привода 10 перемещения датчика; кнопки установки предела измерений 11; отсечки шага 12 и длины трассы 13. Индикацией включения напряжения сети служит цифровое табло. Для калибровки прибора имеется винт с надписью на панели "корр" 14.

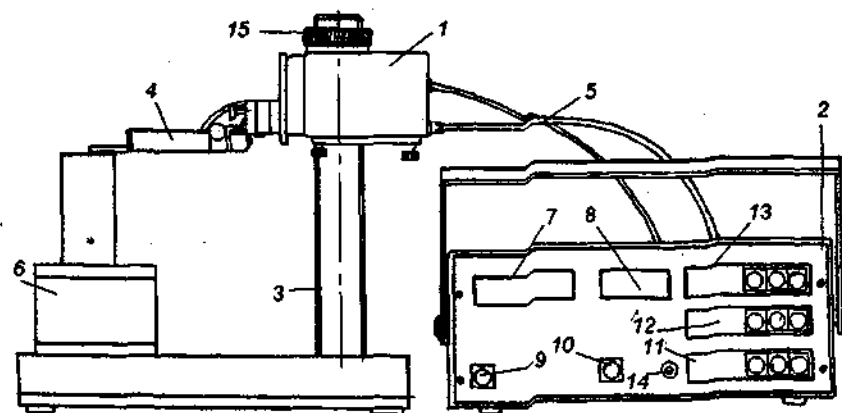


Рис. 7.2.1. Общий вид профилометра модели 296

Таблица 7.2.1. Техническая характеристика профилометра типа 296

Диапазон измерений R_a , мкм	0,02...10
Длина трассы ошупывания при измерении, мм	1,5:3:6
Минимальный диаметр проверяемого отверстия, мм на глубину до 20 мм:	6
	на глубину до 130 мм:
Радиус кривизны вершины щупа (алмазной иглы), мкм	10
Радиус кривизны рабочей части опоры датчика в плоскости измерения, мм, не менее	125
Питается от сети промышленного тока	50 Гц, 220 в

Оборудование и принадлежности

Профилометр модели 296, набор рабочих образцов чистоты поверхности из стали по ГОСТ 2789—75.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия профилометра 296.
2. Установить предел измерения. Предел измерения выбирается минимальным из превышающих ожидаемое значение R_a . Ожидаемое значение величины R_a определяется по таблице и маркировке на выбранном образце чистоты поверхности.
3. Установить требуемую отсечку шага l . Она устанавливается исходя из рекомендаций ГОСТ 2789—73 в зависимости от ожидаемого значения R_a (см. табл. 7.2.2).
4. Установить требуемую длину трассы. Длина трассы выбирается в соответствии с ГОСТ 19300—73 в зависимости от отсечки шага (см. табл. 7.2.2).

Таблица 7.2.2

R_a , мкм	Отсечка шага l , мм	Предел измерений L , мм
до 0,4	0,25	1,5; 3
от 0,4 до 3,2	0,8	3; 6
свыше 3,2	2,5	6

Следует иметь в виду, что полная длина трассы равна $5/3$ длины трассы, указанной на кнопках пульта, т.к. она состоит из предварительного хода и трассы интегрирования.

5. Включить прибор кнопкой "9".
6. Опустить вращением гайки 15 датчик 4 до положения, при котором стрелка индикатора рабочей зоны 8 на пульте управления займет среднее положение.
7. Нажать кнопку "ПУСК". Датчик должен перемещаться по измеряемой поверхности по направлению к приводу. Чтобы убедиться, что привод и датчик правильно установлены относительно измеряемой поверхности, проследите за индикатором на всем пути движения датчика. Стрелка индикатора не должна зашкаливать. После рабочего хода автоматически включается быстрый возврат в исходное положение, а на табло загорается измеренное значение R_a . Если полученное значение может уложиться в меньший предел измерения, следует переключить предел измерения и повторить измерение, для получения более точного результата. Если на табло загорелся сигнал перегрузки "r" следует переключить предел измерения на больший и повторить измерение.
8. Повторить испытания по п.7 три раза.

9. Произвести измерения для 4 образцов разной шероховатости согласно п. п. 2...8.
10. Отключить профилометр от сети переменного тока.
11. Оформить отчет.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткое описание и общий вид профилометра модели 296.
3. Порядок определения R_a .
4. Результаты измерения
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен профилометр?
2. В чем заключается принцип действия профилометра?
3. Какова последовательность определения параметра R_a ?
4. По какой формуле определяется R_a ?

Рекомендуемая литература

- [9], [10], [70], [79], [108], [117], [119], ГОСТ 2789—73, ГОСТ 19299—73, ГОСТ 2.309—73.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ
СКОЛЬЖЕНИЯ В ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ПАРЕ

Цель работы Экспериментальное исследование трения скольжения в поступательной паре.

Общие сведения

Лабораторная установка (рис. 7.3.1) состоит из салазок 6, которым придается поступательное движение по неподвижным направляющим от рукоятки 1 через червячную пару 2, 3 и винтовую пару 4, 5.

На салазках устанавливается испытуемый образец A_n , обращенный поверхностью трения вверх. На него устанавливается испытуемый образец B_n поверхностью трения вниз. Образец накрывается крышкой 7, на которой размещают груз 8. Перед образцом закреплена стальная балка 10 на двух опорах 11. При перемещении салазок 6 вместе с образцом A_n вправо (по стрелке a) образец B_n будет стремиться тоже вправо. Но балка 10, в которую упирается палец 9 крышки 7, удерживает его на месте. В связи с этим, сила трения, приложенная к образцу B_n , полностью передается балке 10. Балка прогибается. Ее прогиб измеряется индикатором 12, установленным на кронштейне.

Определив на установке значение прогиба, по известной формуле сопротивления материалов находим упругую силу P балки, равную в данном случае силе трения $F_{ск}$:

$$P = F_{ск} = \frac{48 EJ\Delta}{l^3}, \quad (7.3.1)$$

где E — модуль упругости исследуемого материала; l — расстояние между опорами балки, мм; Δ — прогиб балки, мм; J — момент инерции поперечного сечения балки относительно оси y , $J = b^3h/12 \text{ мм}^4$; b — толщина балки, мм; h — ширина балки, мм.

Используя формулу (1) Амонтона—Кулона, найдем коэффициент трения скольжения $f_{ск}$. При горизонтальном перемещении груза

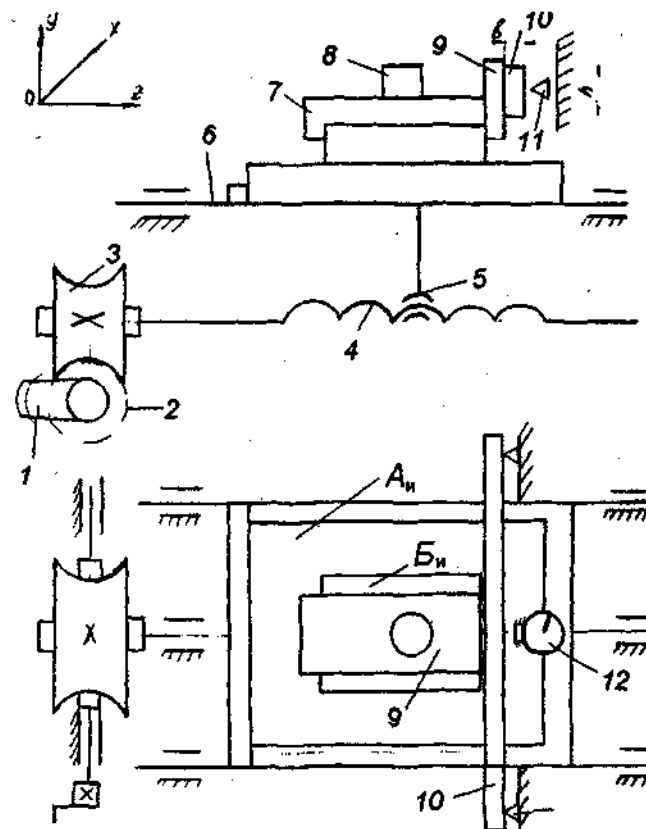


Рис. 7.3.1. Схема установки по определению коэффициента трения скольжения

$$f_{ск} = \frac{F_{ск}}{G}, \quad (7.3.2)$$

где G — вес образца B_n с крышкой 7 и грузом 8 ($G = mg$).

Сила, приложенная к образцу B_n , увеличивается постепенно. Поэтому образец B_n вначале будет двигаться вместе с образцом A_n . Начало движения образцов произойдет тогда, когда балка разовьет усилие, равное силе трения покоя F_0 . В этот момент индикатор покажет максимальное отклонение стрелки. При скольжении образцов показания индикатора будут меньшими в связи с тем, что сила трения движения меньше силы трения покоя. Используя сменные образцы, можно определять коэффициент трения для различных материалов.

Оборудование и принадлежности

Лабораторная установка, испытательные образцы, весы, измерительная линейка, штангенциркуль.

Порядок выполнения работы

1. Штангенциркулем измерить толщину b , ширину h балки 10, установить ее на опоры 11 и измерить расстояние l .
2. Установить индикатор 12 так, чтобы его измерительный наконечник упирался в балку 10.
3. Найти массу m образца B_{II} с крышкой 7 и грузом 8.
4. Положить образец A_{II} горизонтально на салазках 6, установить на него образец B_{II} с крышкой 7 таким образом, чтобы палец 9 был расположен вблизи балки напротив индикатора. Груз 8 установить на крышку 7.
5. Произвести перемещение салазок 6 в сторону балки 10. Палец 9, коснувшись балки 10, начнет ее прогибать. При относительном движении образцов снять показания индикатора. Вернуть салазки назад. Повторить опыт еще два раза. По трем показаниям индикатора вычислить среднее значение прогиба Δ .
6. Вычислить силу трения $F_{ск}$ (формула 1), а по формуле (2) — коэффициент трения $f_{ск}$.
7. Провести опыт с тремя образцами из разных материалов.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема установки для исследований (рис. 7.3.1).
3. Геометрические характеристики сечения балки: толщина b , мм; ширина h , мм; момент инерции поперечного сечения относительно оси, перпендикулярной к направлению изгиба J , мм²; расстояние между опорами l , мм.
- 4: Результаты измерений и вычислений (табл. 7.3.1).

Таблица 7.3.1

Номер опыта	Материалы образцов	Масса образца с крышкой и грузом m , кг	Прогиб балки Δ , мм	Сила трения $F_{ск}$, Н	Коэффициент трения $f_{ск}$

5. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Основные виды трения и его роль в механизмах.
2. Что такое угол трения и его связь с коэффициентом трения?
3. Предложите схему установки для определения коэффициента трения скольжения.
4. Напишите формулу для определения коэффициента трения.
5. Напишите условия самоторможения резьбы.

Рекомендуемая литература

[9], [10], [119], [215].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В РЕЗЬБЕ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ И НА ОПОРНОМ ТОРЦЕ ГАЙКИ

Цель работы Экспериментальное определение коэффициентов трения скольжения в резьбе болтового соединения и на опорном торце гайки. Нахождение к.п.д. винтовой пары.

Общие сведения

Приспособление типа ДМ27А предназначено для нагружения и измерения силы затяжки болта.

Приспособление (рис. 7.4.1) состоит из основания 1, на котором крепится динамометрическая пружина 2. В ее центре выполнено сквозное отверстие, в которое вставляется исследуемый болт. Он опи-

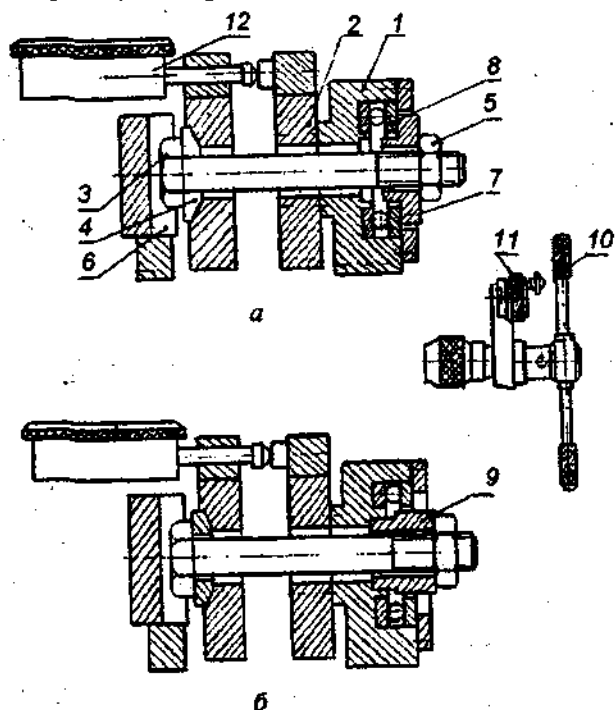


Рис. 7.4.1. Схема приспособления типа ДМ27М

рается на сферическую шайбу. От проворачивания при завинчивании гайки 5 (затяжке) болт 3 предохраняет сухарь 6, вставленный в отверстие основания 1.

Для исследования соединения приспособление собирают по двум схемам:

— По схеме рис. 7.4.1, а — под гайку 5 устанавливают втулку 7, опирающуюся на упорный подшипник 8. Что позволяет исключить трение на опорной поверхности гайки 5 и определить момент T_p сил трения в резьбе;

— По схеме рис. 7.4.1, б — под гайку 5 устанавливают втулку 9, фиксируемую по схеме проворачивания в основании 1 с помощью лысок (см. А—А). При этом подшипник 8 не вращается, что позволяет определить момент T_k , прикладываемый к гайке.

Затяжку болтового соединения производят протарированным торсионным динамометрическим ключом 10, на котором установлен индикатор 11 (рис. 7.4.1, а). По его показаниям (Δ') определяют момент T_k на ключе 10 (см. зависимость (7.4.13)). Предельный момент на ключе $[T_k] = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Осевое усилие $F_{\text{зат}}$ затяжки болта контролируют (см. зависимость (7.4.12)) по показаниям индикатора 12 динамометрической пружины 2 (рис. 7.4.1, а). Предельная сила нагружения динамометрической пружины $[F_{\text{зат}}] = 8000 \text{ Н}$.

Расчетные зависимости

Болтовые соединения собираются с предварительной затяжкой. При этом болт испытывает растяжение силой $F_{\text{зат}}$ и кручение моментом T_p . Момент T_k , прикладываемый к гайке (рис. 7.4.2), определяется из выражения:

$$T_k = T_p + T_{\text{тр}}, \text{ Н} \cdot \text{мм}, \quad (7.4.1)$$

где T_p — момент сил трения в резьбе, Н·мм:

$$T_p = 0,5 F_{\text{зат}} d_{\text{сп}} \text{tg}(\Psi + p'), \quad (7.4.2)$$

$T_{\text{тр}}$ — момент сил трения на опорном торце гайки, Н·мм,

$$T_{\text{тр}} = 0,5 F_{\text{зат}} f_{\text{ск}} D_{\text{сп}}. \quad (7.4.3)$$

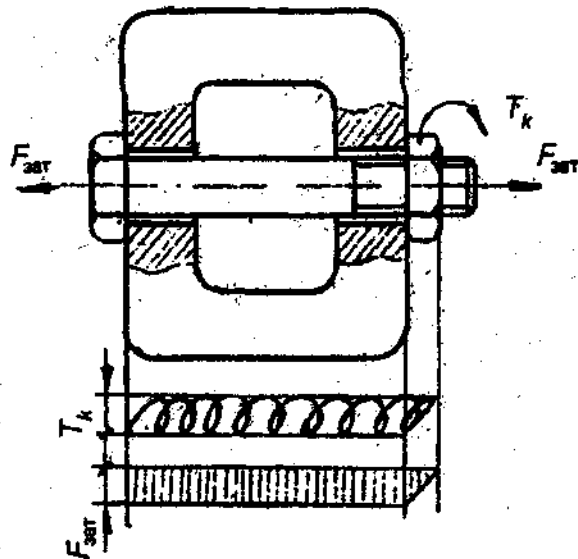


Рис. 7.4.2. Схема нагружения болтового соединения

В формулах (7.4.2) и (7.4.3): $F_{зат}$ — усилие (осевое) затяжки болта, Н; $d_{ср}$ — средний диаметр резьбы болта, мм; Ψ — угол подъема винтовой линии, град (см. рис. 7.4.2)

$$\Psi = \arctg(p/\pi d_{ср}), \quad (7.4.4)$$

где p — шаг резьбы, мм; ρ' — приведенный угол трения, град.

$$\rho' = \arctg f_{ск} = \arctg [f_{ск}/\cos(\alpha/2)], \quad (7.4.5)$$

где $f_{ск}$ — приведенный коэффициент трения в резьбе,

$$f_{ск} = f_{ск}/\cos(\alpha/2), \quad (7.4.6)$$

где $f_{ск}$ — коэффициент трения в резьбе; α — угол профиля резьбы, град; для метрической резьбы $\alpha = 60^\circ$; $f_{т}$ — коэффициент трения на опорном торце гайки; $D_{ср}$ — средний диаметр опорной поверхности гайки, мм (см. формулу (7.4.3))

Из равенства (7.4.2) с учетом зависимости (7.4.4)

$$\rho' = \arctg \frac{2T_p}{F_{зат} d_2} - \Psi = \arctg \frac{2T_p}{F_{зат} d_2} - \arctg \frac{p}{\pi d_2}, \quad (7.4.7)$$

Решая совместно зависимости по определению ρ' и $f_{ск}$, находим:

$$f_{ск} = \frac{\cos \alpha/2}{d_2} \left(\frac{2T_p}{F_{зат}} - \frac{p}{\pi} \right) / \left(1 + 2 \frac{T_p}{F_{зат} d_2} - \frac{p}{\pi d_2} \right).$$

С целью упрощения расчетов коэффициента $f_{ск}$ трения в резьбе необходимо его значения определять по зависимости

$$f_{ск} = \frac{\cos \alpha/2}{d_2} \left(\frac{2T_p}{F_{зат}} - \frac{p}{\pi} \right) = \frac{0,866}{d_2} \left(\frac{2T_p}{F_{зат}} - \frac{p}{\pi} \right). \quad (7.4.8)$$

Из равенства (7.4.3) с учетом зависимости (7.4.1) коэффициент трения на торце гайки:

$$f_{т} = 2T_{т}/(F_{зат} D_{ср}) - 2(T_{к} - T_{р})/(F_{зат} D_{ср}). \quad (7.4.9)$$

С учетом выше приведенных зависимостей к.п.д. винтовой пары:

а) без учета трения на опорном торце гайки

$$\eta = \tg \Psi / \tg(\Psi + \rho') = F_{зат} p / (T_p 2\pi); \quad (7.4.10)$$

б) с учетом трения на опорном торце гайки

$$\eta' = \tg \Psi / \left(\tg(\Psi + \rho') + f_{т} \frac{D_{ср}}{d_1} \right) = F_{зат} p / (T_{к} 2\pi). \quad (7.4.11)$$

Оборудование и принадлежности

Приспособление ДМ27М, торсионный динамометрический ключ, комплект болтов М12...М20 с гайками, градуировочные графики для динамометрических пружин и ключа.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия установки ДМ27М.

2. Произвести обмер болтов и гаек, указанных преподавателем для исследования. Результаты исследования занести в табл. 7.4.1.

3. Определить значение допускаемой силы затяжки болта по формуле (7.4.4).

4. Определить значения усилий затяжки болта, равные:

$$F_{\text{зат1}} = 0,252 [F]_{\text{зат}}; F_{\text{зат2}} = 0,5 [F]_{\text{зат}}; F_{\text{зат}} = 0,75 [F]_{\text{зат}},$$

при которых и произвести исследование соединения.

5. Определить показания индикатора 12 динамометрической пружины 2 (рис. 7.4.1, а), соответствующие усилиям затяжки болта по формуле:

$$\Delta = 2 \cdot 10^{-5} F_{\text{зат}}, \text{ мм.} \quad (7.4.12)$$

6. Собрать приспособление по схеме рис. 7.4.1, а.

7. Закручивая гайку 5 динамометрическим ключом 10 (рис. 7.4.1, в), последовательно создать рубежные усилия затяжки болта, контролируя их величины по показаниям индикатора 12.

8. Для выбранных усилий затяжки болта определить показания индикатора 11 динамометрического ключа 10 (рис. 7.4.1, в).

9. Определить величины моментов на ключе, соответствующие рубежным усилиям затяжки болта, по формуле:

$$T_k = 23,4 \cdot 10^3 \Delta', \text{ Н} \cdot \text{мм.} \quad (7.4.13)$$

При сборке приспособления по схеме рис. 7.4.1, а $T_k = T_p$.

10. По формуле (7.4.10) определить величины η_1 , η_2 и η_3 винтовой пары без учета трения на опорном торце гайки, соответствующие выбранным усилиям затяжки.

11. Собрать приспособление по схеме рис. 7.4.1, б и выполнить действия согласно пунктам 7...9. При этом момент T_k на ключе равен сумме моментов T_p и T_t (см. зависимость (7.4.1)).

12. По формуле (7.4.9) определить коэффициенты трения на опорном торце гайки, соответствующие расчетным усилиям.

13. По формуле (7.4.11) определить значения к.п.д. винтовой пары, соответствующие усилиям $F_{\text{зат1}}$, $F_{\text{зат2}}$ и $F_{\text{зат3}}$.

14. Результаты измерений занести в таблицу 7.4.1.

Таблица 7.4.1

Номер	Наименование	Числовые значения			
		обозначение (ед. изм.)	1	2	3
1	Сила затяжки болта	$P_{\text{зат}}$ (Н)			
2	Показания индикатора 12 на пружине 2 (рис. 7.4.1, а)	Δ (мм)			
СХЕМА СБОРКИ ПО РИС. 7.4.1, а					
3	Показания индикатора 11 на ключе	Δ' (мм)			
4	Момент на ключе	$T_k = T_p$ (Н · м)			
5	Коэффициент трения в резьбе	f_p			
6	К.п.д. винтовой пары без учета трения на торце гайки	η			
СХЕМА СБОРКИ ПО РИС. 7.4.1, б					
7	Показания индикатора 11 на ключе 10 (рис. 7.4.1, б)	Δ (мм)			
8	Момент на ключе	T_k (Н · м)			
9	Момент трения на опорном торце гайки	T_t			
10	Коэффициент трения на опорном торце гайки	f_t			
11	К.п.д. винтовой пары с учетом трения на торце гайки	η			

15. Построить графики изменения моментов T_p и T_k в зависимости от усилий затяжки.

16. Составить отчет о проделанной работе.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема приспособления ДМ27М (рис. 7.4.1).
3. Характеристика исследованных болтов и гаек (табл. 7.4.1).
4. Результаты определения коэффициентов трения скольжения в резьбе болта $f_{\text{ск}}$ и на опорном торце гайки f_t (табл. 7.4.1).
5. Результаты определения к.п.д. винтовой пары (табл. 7.4.1).

6. Графики изменения моментов T_p и T_k в зависимости от усилий $F_{\text{зат}}$ затяжки болта.

7. Выводы о проделанной работе с анализом соотношений между моментами T_p и T_k , коэффициентами $f_{\text{ск}}$ и f_t и к.п.д. винтовой пары.

Контрольные вопросы

1. Какие деформации испытывает болт при затяжке соединения?
2. Чему равен момент T_k на ключе с учетом и без учета трения на опорном торце гайки?
3. Как определить момент T_p сил трения в резьбе?
4. Как определить момент T_t сил трения на опорном торце гайки?
5. Где приложена равнодействующая сила трения на опорном торце гайки?
6. От чего зависит и как повысить к.п.д. винтовой пары?
7. Как определить угол подъема винтовой линии?
8. Чему равен приведенный коэффициент трения в резьбе?

Рекомендуемая литература

[9], [10], [119], [215].

Лабораторная работа № 5

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ

Цель работы: Определение предельных и допустимых режимов трения материалов на основе полимеров.

Общие сведения

Потеря работоспособности узлов трения, в которых используются полимеры и композиты на их основе, происходит в результате увеличения температуры в зоне трения выше температуры размягчения полимера и превышения интенсивности изнашивания некоторого предельного значения. Достижение критического режима для полимерных материалов во многом определяется процессом формирования слоев фрикционного переноса, который зависит от программы проведения испытаний, устанавливающий порядок задания параметров испытаний и продолжительность действия того или иного фактора (МР 74—82). В этой связи под критическим режимом понимается область значений нагрузок и скоростей ограниченных кривой, представляющей собой совокупность предельных значений нагрузок и скоростей скольжения, а критериями работоспособности являются зависимости коэффициента трения и износа от параметров P и V внутри этой области.

Предельное значение нагрузки в статике соответствует давлению, при котором испытуемый образец переходит в состояние неограниченной ползучести. При трении предельное значение нагрузки уменьшается с ростом температуры, величина которой определяется условиями теплоотвода из зоны трения, силой трения и скоростью скольжения.

Предельное значение скорости скольжения соответствует установлению на поверхности трения температуры, близкой или равной температуре размягчения полимерного материала. Результат обработки результатов испытаний представляет кривую $[PV]$, являющуюся совокупностью предельных значений нагрузок и скоростей (рис.7.5.1).

Оценка изнашивания в диапазоне, ограниченном предельными значениями параметров трения, состоит в нахождении значений P и V , соответствующих интенсивности изнашивания 10^{-10} . Это значение соответствует принятой в качестве сравнительного эталона допустимой скорости изнашивания, равной 0,25 мкм/ч. Нахождение допусти-

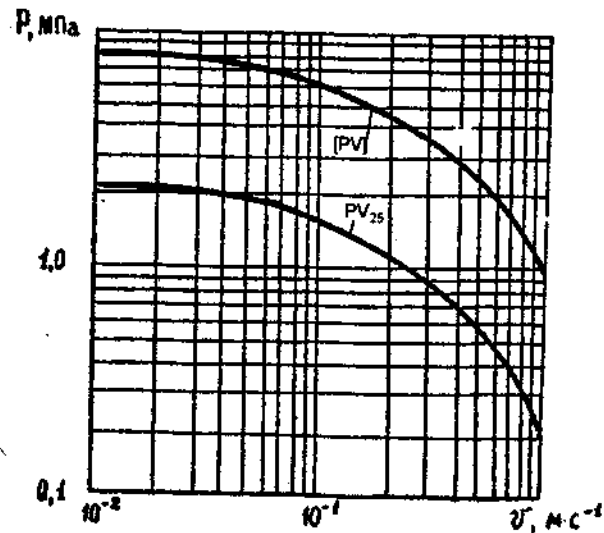


Рис. 7.5.1. P—V диаграмма. Совокупность предельных [PV] и допустимых PV_{25} значений удельных нагрузок P и скоростей скольжения материала V

ных параметров трения осуществляется на основе имеющихся расчетно-экспериментальных зависимостей. В программу испытаний входит экспериментальное определение скорости изнашивания при выбранных параметрах трения и отыскание уточненных значений скоростей скольжения и удельных нагрузок, соответствующих скорости изнашивания $0,25$ мкм/ч. По экспериментальным зависимостям скорости изнашивания, полученным для ряда значений параметров трения, находятся уточненные значения скорости скольжения и нагрузки, которые представляются в координатах $P—V$ в виде кривой допустимых значений PV_{25} .

На каждом нагрузочно-скоростном режиме эксперимент повторяется три раза. Величина линейного износа измеряется непрерывно с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5$ мкм.

Испытания проводятся на одном образце по всем режимам, а затем образец заменяется и испытания повторяются. При переходе с менее интенсивного режима на более интенсивный, поверхность образца не очищается, что сокращает время, затрачиваемое на период неустановившегося изнашивания и формирование слоев фрикционного переноса.

В качестве испытательной машины используют машину трения 2070 СМТ-1.

Техническая характеристика машины 2070 СМТ-1

1. Схема испытаний: диск—диск; вал—штулка; диск—колодка.
2. Частота вращения вала нижнего образца — $75 \dots 1500$ мин⁻¹.
3. Диапазоны измерения частоты вращения вала нижнего образца, мин⁻¹:
диапазон А: $75 \dots 750$, мин⁻¹;
диапазон Б: $150 \dots 1500$, мин⁻¹.
4. Диапазон измерения момента трения, Н:
диапазон I: ($1 \dots 10$, Н·м); диапазон II: ($2 \dots 20$, Н·м).
5. Предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения случайной составляющей приведенной погрешности измерителя момента трения — 1%.
6. Диапазон измерения усилий на образцы:
диапазон I для образцов “диск—диск” и “диск—колодка” $200 \dots 2000$, Н;
диапазон II для образцов “вал—штулка” $500 \dots 5000$ Н.
7. Предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения приведенной погрешности измерителя усилий — 1%.
8. Потребляемая мощность не более 4,5 кВт.
9. Габаритные размеры: испытательной установки — $1400 \times 700 \times 1300$ мм, пульты — $650 \times 850 \times 1700$ мм.
10. Масса — 800 кг.

Машина 2070 СМТ-1 состоит из испытательной установки, пульта управления и соединительных устройств.

Принцип действия машины заключается в истирании пары образцов, прижатых друг к другу силой N . В процессе испытаний регистрируется момент трения и температура фрикционного разогрева образцов.

Взаимосвязь всех узлов и механизмов машины представлена на кинематической схеме машины (рис. 7.5.2). Электродвигатель 38 через зубчатый ремень 5 вращает шкивы 3 и 6. Шкив 3 через предохранительный штифт 4, вал 39, муфту 9, датчик момента трения 10 и муфту 12 вращает вал бабки 14, на котором устанавливают контрообразец 27. Шкив 6 через вал 8, кулачковую муфту 11, вал 16, шестерни 23 и 24 вращает вал каретки 25, на котором устанавливают образец 26.

Образец 26 прижимают к контрообразцу 27 пружиной 33. Величину силы нагружения регулируют осью—винтом 29, который передает нагрузку на образцы через пята 30, кронштейн 28 и корпус каретки 22.

Величина нагрузки на образцы измеряется датчиком нагрузки 36, в качестве которого используется прецизионное сопротивление. Скорость вращения вала 14 определяется тахогенератором 37. В процессе работы производится отсчет числа циклов вращения нижнего

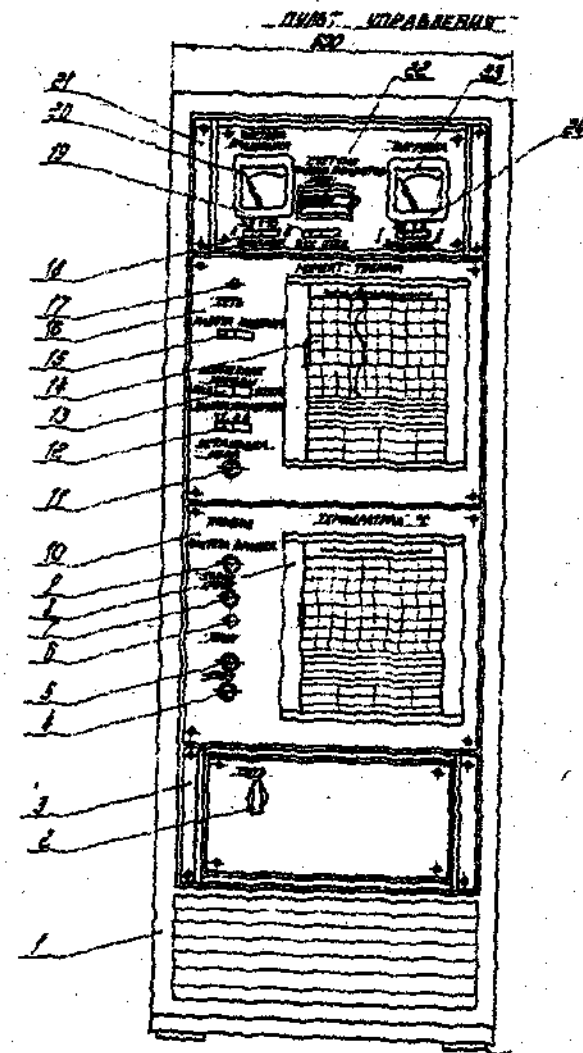
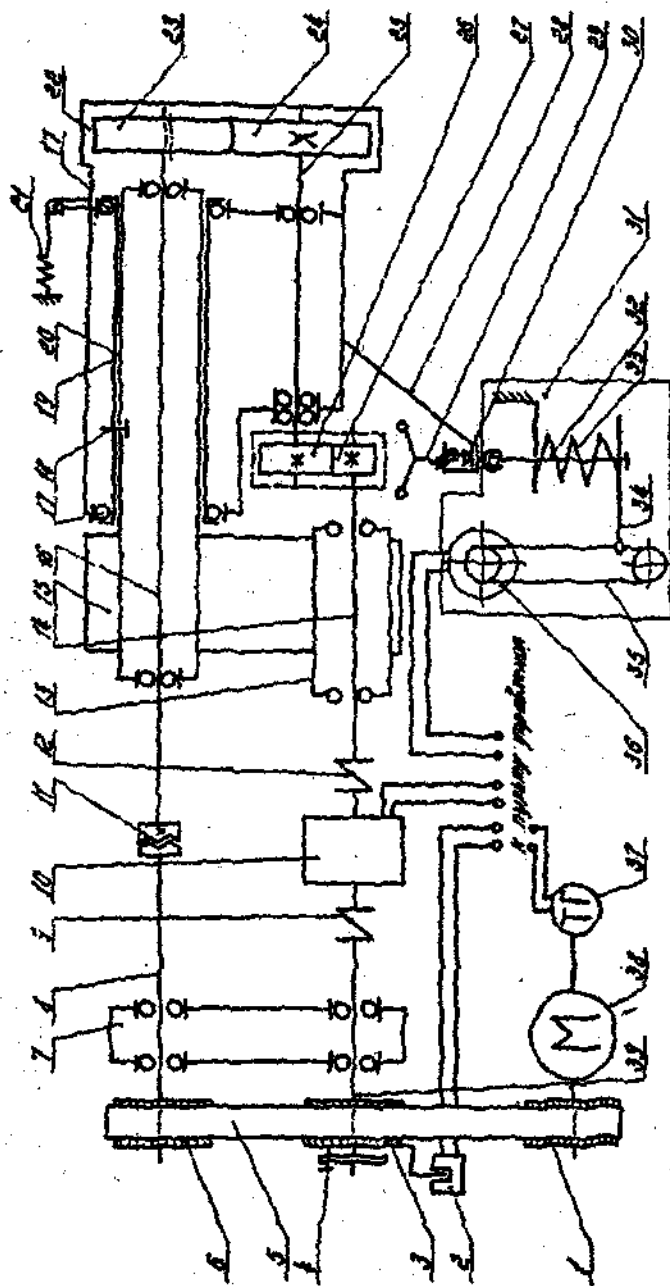


Рис. 7.5.3. Пульт управления машин 2070 СМТ-1

образца. Датчиком числа циклов 2 служит бесконтактный выключатель. Измерение температуры производится терморезисторами.

Коэффициент проскальзывания образцов "диск—диск" при одинаковом диаметре верхнего и нижнего образцов изменяют, меняя сменный шкив 6.

При испытании по схеме диск—колодка муфта 11 выводится из зацепления, вал 16 фиксируется относительно корпуса, вместо образца 26 устанавливается держатель образца типа колодки или частичного вкладыша.

На верхней плоскости станины установлены бабка 13, датчик момента трения 10, бабка привода 7 и каретка 22. На лицевой передней части станины размещен механизм нагружения 31. Вся верхняя часть машины закрыта кожухом. С левой стороны установки под кожухом находится ременная передача со шкивом. Фиксацию каретки в верхнем положении осуществляют фиксатором.

Каретка 22 предназначена для проведения испытаний с образцами “диск—диск” и “диск—колодка” при усилии на образцы до 2000 Н.

Пульт управления представляет собой стандартную стойку, в которой смонтированы блоки и панели управления (рис. 7.5.3). На лицевой панели верхней части пульта расположены органы управления и устройства выдачи информации: указатель частоты вращения нижнего образца 20, счетчик числа оборотов 22, указатель нагрузки 23, переключатель диапазонов измерения частоты вращения контробразца 18 и нагрузки 24. Переключатель рода работы “Проверка”, “Работа” 15, расположенный в средней части пульта управления, устанавливает вид работы на машине. Там же расположены: переключатель диапазонов измерения момента трения 12, выключатель освещения камеры 13, потенциометры типа КСП-4, позволяющие регистрировать кинетику изменения момента трения 14 (дана в милливольтх) и температуры фрикционного разогрева 8.

Электродвигатель привода машины запускают в работу кнопкой “Пуск” 5, останавливают кнопкой “Стоп” 4. В случае срочной необходимости машину можно выключить, нажав кнопку “Стоп”, расположенную на испытательной установке.

Оборудование и принадлежности

Машина для испытания материалов на трение и износ типа 2070 СМТ-1, пластмассовые образцы-вкладыши, стальные ролики — сталь 45, НRC 45, $R_a = 0,2$ мкм, весы ВЛА-200, промывочные жидкости (гексан, ацетон).

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия машины для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1.
2. Провести градуировку потенциометра для измерения момента трения.

2.1. Установить переключатель рода работ 15 (рис. 7.5.3) в положение “Проверка”.

2.2. Зафиксировать штифтом муфту 9 относительно корпуса датчика момента 10 (рис. 7.5.2).

2.3. На вал шпинделя 7 установить градуировочный рычаг с противовесом и чашкой (рис. 7.5.4), уравновесить и закрепить гайкой 8.

2.4. Кнопкой 12 установить диапазон измерения момента трения в положение “×1” (рис. 7.5.3).

2.5. Переключателем 2 включить питание машины, а переключателями на потенциометре 15 включить питание потенциометра и механизма протяжки диаграммной ленты.

2.6. Резистором 11 установить в нулевое положение стрелку потенциометра 14.

2.7. На чашку рычага установить последовательно грузы массой 0,25; 0,25; 0,5; 0,5 кг, отмечая на диаграммной ленте суммарное значение массы устанавливаемых грузов для каждой ступени нагружения.

2.8. Отключить питание потенциометра. Снять диаграммную ленту.

2.9. Построить в координатах $U - M_{тр}$ градуировочный график. U -показания потенциометра в мВ, соответствующие значению вращающегося момента $M_{тр}$ в Н·м, определяемого из соотношения:

$$M_{тр} = 10GL, \text{ [Н·м]},$$

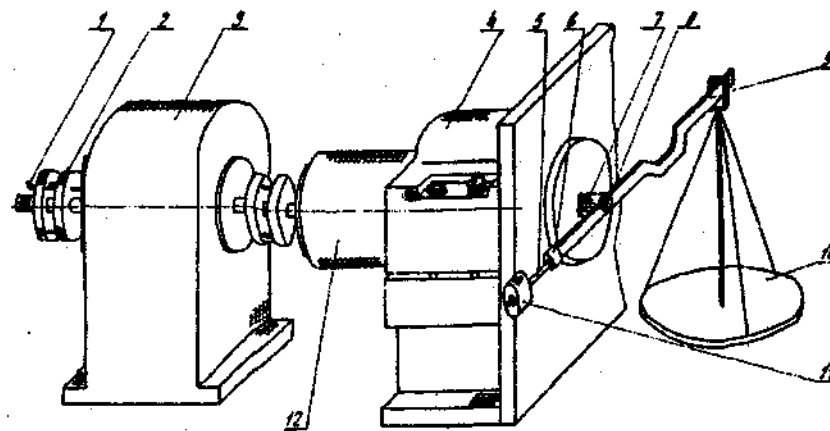


Рис. 7.5.4. Схема градуировки момента трения

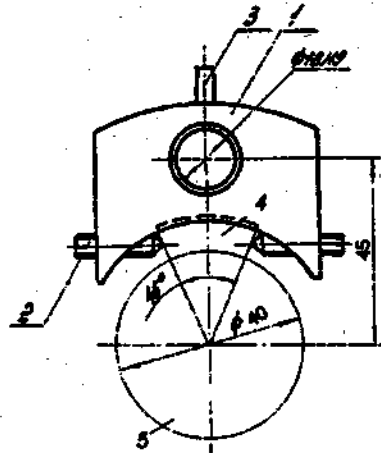


Рис. 7.5.5. Схема закрепления образца в держателе

где G — масса установленного на чашку груза, кг; L — длина плеча градуировочного рычага.

2.10. Снять градуировочный рычаг, убрать фиксирующий штифт, переключатель 15 установить в положение "Работа".

3. Подготовить машину к испытаниям.

3.1. Установить и закрепить в держателях образец — "частичный вкладыш" 4 и контрообразец — ролик 5 (рис. 7.5.5).

3.2. Протереть поверхности трения тампоном, смоченным в гексане или другом растворителе. Установить термопару в отверстие пластмассового образца, просверленного на расстоянии 1 мм от поверхности трения.

4. Провести испытания.

4.1. Установить регулятор скорости 9, 7 в "0" положение. Кнопкой "Пуск" 5 включить тиристорный привод вращения двигателя. С помощью прибора 20 и регуляторов 9 и 7 установить частоту вращения вала с роликом, соответствующую скорости скольжения 0,5 м/с согласно формуле:

$$V = \omega r, \quad (7.5.1)$$

где r — радиус ролика, м; $\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота вращения, с^{-1} , где ν — частота вращения, с^{-1} определяется по прибору 20.

4.2. Включить питание и протяжку ленты переключателями потенциометров 14 и 8. Установить, если необходимо, резистором 11 нулевое положение стрелки потенциометра, измеряющего момент тре-

ния. Задать скорость движения диаграммной ленты 180 мм/час. Провести запись начальных значений температуры и момента трения в течение 5 мин.

4.3. Установить на нагружающую подвеску, связанную с кареткой 12, груз массой 10 кг.

4.4. После стабилизации установления постоянного значения момента трения и температуры, примерно через 10—15 минут, устанавливается нагрузка 20 кг. Испытания на этой ступени нагрузки ведут также, как и для предыдущей нагрузки. Затем увеличивают нагрузку еще на 10 кг.

4.5. Величина нагрузки примерно 50...60 кг, при которой произойдет оплавление поверхностного слоя, будет предельной. В этот момент разгружают каретку, производят запись "0" значения момента трения.

4.6. Выключают привод вращения двигателя кнопкой "Стоп".

4.7. Отключить питание потенциометров.

4.8. Отключить питание сети пульта управления выключателем 2.

4.9. Снимается диаграммная лента с записью момента трения и температуры.

5. Обработка результатов испытаний.

5.1. Для каждого значения нагрузки определяется коэффициент трения в соответствии с формулой

$$f = \frac{M}{rN}, \quad (7.5.2)$$

где M — значение установившегося момента трения, определяют по диаграмме и градуировочному графику в Н·м; r — радиус ролика в м; N — масса груза, установленного на подвеску каретки.

5.2. Построить графики зависимости коэффициента трения и температуры от нагрузки.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Кинематическая схема и принцип работы установки 2070 СМТ-1.
3. Графики зависимости температуры и коэффициента трения от нагрузки.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена машина 2070 СМТ-1?
2. Какие виды испытаний можно проводить на данной машине?
3. В чем заключается суть метода оценки предельного и допустимого режима граничного трения пары металл—полимер?
4. Чем отличаются лабораторные испытания от стендовых и эксплуатационных?

Рекомендуемая литература

[2], [3], [9], [10], [109], [175], [215], МР 74—82.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы Экспериментальное определение зависимости коэффициента трения от температуры фрикционного разогрева.

Общие сведения

При разработке новых материалов для работы в узлах трения машин и механизмов широко используется метод экспериментальной оценки фрикционной теплостойкости согласно ГОСТ 23.210—80.

Сущность метода заключается в том, что вращающийся и неподвижный кольцевые образцы исследуемого сочетания материалов устанавливаются соосно, прижимают друг к другу торцевыми рабочими поверхностями с заданным осевым усилием и ступенчато изменяют температуру фрикционного разогрева путем ступенчатого изменения частоты вращения подвижного образца. В процессе испытаний определяют значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания для каждой ступени температуры фрикционного разогрева, а о фрикционной теплостойкости материалов судят по зависимости значения этих величин от температуры.

Фрикционная теплостойкость материалов — это способность трущихся материалов сохранять неизменным значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания в широком диапазоне температур, возникающих при трении.

Фрикционную теплостойкость материалов оценивают по величине коэффициента трения и интенсивности изнашивания при разных значениях температуры, возникающей в процессе испытания.

Устройство и принцип действия машины УМТ-1

Машина для испытания материалов на трение УМТ-1 относится к типу универсальных машин трения и позволяет испытывать на одной машине различные пары трения “диск-палец”, “вал-втулка” и “втулка-втулка”, соответствующие наиболее распространенным узлам трения.

Техническая характеристика машины УМТ-1

1. Схема испытаний: палец—диск, втулка—втулка, вал—втулка.
 2. Нагрузка на образцы — 20...4000 Н
 3. Частота вращения — 15...3000 мин⁻¹
 4. Тип моментометра — электромеханический.
 5. Диапазоны измерения момента силы трения при частоте вращения шпинделя привода:
 - от 15 до 1500 мин⁻¹ — от 4 до 40 Н·м;
 - от 30 до 3000 мин⁻¹ — от 2 до 20 Н·м.
 7. Радиусы установки образцов типа "палец": (60±2); (90±0,23); (120±0,26); (150±0,26) мм.
 8. Привод машины — электромеханический с плавным регулированием частоты вращения.
 9. Потребляемая мощность не более 15 кВт.
- Машина УМТ-1 состоит из испытательной установки и пульта управления.

В испытательной установке (рис. 7.6.1 и 7.6.2) электродвигатель 1 через клиноременную передачу 2 вращает шпиндель 3 с установленным на нем диском 5 и образцом 6.

Нагрузка на образцы 6 и 7 создается сжатым газом, поступающим в камеру 21. Давление воздуха преобразуется мембраной 22 в нагрузку которая через подшипник 24, шток 25, сферический подшипник 26 и диск 8 прижимает друг к другу испытываемые образцы 7 и 6. Нагрузку измеряют с помощью образцовых манометров.

Сферический подшипник 26 и ленты 11 позволяют диску 8 самоустанавливаться, обеспечивая прижим образцов 7 к образцу 6. В процессе испытаний шток 25 перемещается внутри полого вала 13, компенсируя износ образцов.

Момент силы трения образцов передается диском 8 через упругие втулки или винты 30, диск 10, упругие ленты 11, фланец 12, полый вал 13, рычаг 15 и шарикоподшипник 16 на упругий элемент 17, прогиб которого преобразуется индуктивным датчиком в электрический сигнал, измеряемый потенциометром.

Для смены образцов и приспособлений силоизмеритель перемещают по направляющим станины, вращая маховик 27 передачи "винт—гайка" 28.

Для регистрации числа оборотов шпиндель 3 через червячную передачу 18 и шестерни 19 вращает лепесток датчика числа оборотов 20.

Вал 30 и кривошип 31 служат для присоединения шатуна установки качательного движения.

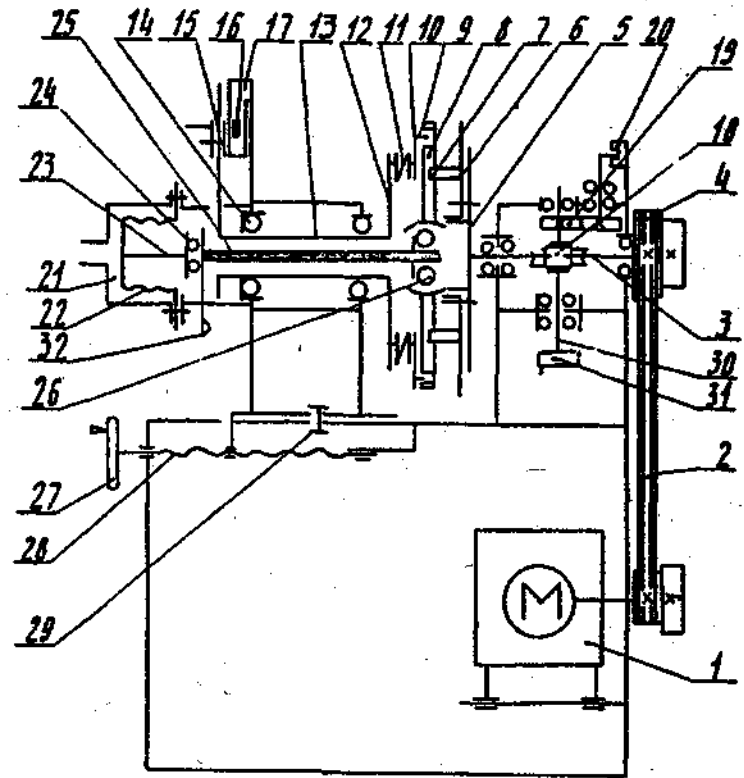


Рис. 7.6.1. Кинематическая схема машины УМТ-1

Машина имеет прибор для измерения скорости вращения шпинделя и потенциометр для измерения температуры.

Испытательная установка смонтирована на литой чугунной станине 1 и размещена на виброизолирующих опорах 2 (рис. 7.6.2).

На приводе 3 установлен шкив с двумя ступенями: одна ступень с передаточным отношением 1:2 для получения диапазона вращения шпинделя привода от 15 до 1500 мин⁻¹, другая ступень с передаточным отношением 1:1 для получения диапазона вращения привода от 30 до 3000 мин.

В пределах каждого диапазона скорость вращения плавно изменяется электродвигателем в пределах 100:1.

Клиноременная передача закрыта кожухом 4.

На наклонной плоскости станины расположена панель, на которой находится пневмоаппаратура для создания и контроля нагрузки

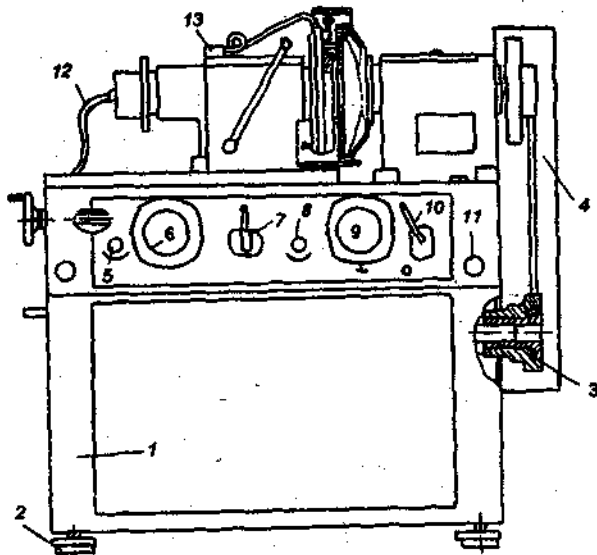


Рис. 7.6.2. Общий вид машины УМТ-1

на пары трения: регулятор давления 5, манометр 6, кран последовательного включения 7, редуктор давления 8, манометр 9, кран управления 10, а также кнопка "стоп" 11.

Сверху станины установлен уровень. Станина имеет окно для доступа к электродвигателю, тахогенератору, пневмоаппаратуре и электроразводке. В рабочем положении окна закрыты крышками.

Рукав 12 подсоединен к пневмосети или баллону со сжатым газом.

Подвод охлаждающей воды и слив осуществляют через коллектор 13.

Пульт управления предназначен для размещения аппаратуры управления, измерения и сигнализации. Внутри пульта установлен блок управления комплексного тиристорного электропривода.

Вся остальная аппаратура размещена на панелях. Органы управления и устройства выдачи информации вынесены на лицевую панель пульта. На верху лицевой панели установлены потенциометры регистрации момента и температуры. Панель управления функционально разделена на две части — панель измерения скорости и панель измерения момента. В верхней части панели измерения скорости располо-

жена лампа "Сеть", сигнализирующая о подаче напряжения на машину. На этой же панели размещены следующие приборы: счетчик числа оборотов; микроамперметр измерения скорости вращения шпинделя; тумблер переключения диапазонов измерения скорости вращения; регуляторы скорости вращения "Грубо" и "Точно".

Диапазоны измерения скоростей при различных положениях тумблера и ремней клиноременной передачи показаны в таблице на панели измерения скорости.

На панели измерения момента размещены кнопки "Пуск" и "Стоп" управления электроприводом. Пульт управления соединен с испытательной установкой двумя соединительными устройствами через штепсельные разъемы.

Диапазоны измерения скоростей при различных положениях тумблера и ремней клиноременной передачи показаны в таблице на панели измерения скорости.

На панели измерения момента размещены кнопки "ПУСК" и "СТОП" управления электроприводом. Пульт управления соединен с испытательной установкой двумя соединительными устройствами через штепсельные разъемы.

Оборудование и принадлежности

Машина для испытания материалов на трение тип УМТ-1; градуировочный график скорости вращения шпинделя и момента трения; образцы для испытания; промывочные жидкости — гексан, ацетон.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку к работе по схеме "втулка-втулка".
2. Промыть образцы в бензине или ацетоне и высушить.
3. Установить подвижный и неподвижный образцы в держателях машины УМТ-1 (рис. 7.6.1).
4. В отверстие неподвижного образца плотно устанавливают два термоэлектрических преобразователя с термоэлектродами по ГОСТ 6616—74, диаметром 0,5 мм таким образом, чтобы их головки касались материала неподвижного образца на дне отверстия.
5. Протереть образцы бензином или ацетоном и высушить.
6. Произвести приработку образцов при установленной нагрузке 600 Н и частоте вращения 50 мин⁻¹ до стабилизации момента трения (отклонения от среднего значения на данной ступени должны быть не более 5%) и прилегания сопряженных торцевых поверхностей, характеризуемого следами трения на площади не менее 90% рабочей поверхности трения каждого образца. Площадь, занимаемую следами

трения, контролируют визуально осмотром рабочих поверхностей после 5 мин, а затем через каждые 30 мин испытаний.

Пуск машины УМТ-1 проводят в следующей последовательности: сближают образцы до касания, приводят подвижной образец во вращение и затем прикладывают нагрузку. Отсчет продолжительности испытаний и количества оборотов при приработке и испытаниях производят от момента приложения нагрузки.

7. Образцы устанавливают в держателях для проведения испытаний протирают и испытывают при требуемом усилии при ступенчатом увеличении частоты вращения шпинделя выбранную из ряда частот: 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 мин⁻¹.

В области ожидаемых значений критических температур допускается проведение испытаний с введением дополнительных частот вращения, находящихся в интервалах между значениями, перечисленными выше.

При испытаниях на каждой из ступеней частот вращения в интервале частот 50—1000 мин⁻¹ длительность испытаний на каждой ступени составляет 15 мин.

8. Для каждой из ступеней частот вращения и каждой испытанной пары образцов определяют среднее значение момента M , Н·см трения и температуры T , °С по зависимостям

$$M = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} M(t) dt, \quad (7.6.1)$$

$$T = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} T(t) dt, \quad (7.6.2)$$

где Δt интервал времени на каждой из ступеней частот вращения, соответствующий участку диаграммы записи температуры при установленном тепловом режиме (изменения температуры на этом участке должно быть в пределах не более 5% от среднего значения, С).

ПРИМЕЧАНИЕ. Допускается использование приближенной оценки путем разбиения интервала на 10 равных частей.

В этом случае оценку проводят по формулам:

$$M = \frac{1}{10} \sum_1^{10} M_i, \quad T = \frac{1}{10} \sum_1^{10} T_i, \quad (7.6.3)$$

где M_i — значения момента сил трения на данной ступени в i -й точке разбиения; T_i — значения температуры в i -й точке разбиения, среднее по результатам измерений двумя термоэлектрическими преобразователями.

9. Вычисляют для всех испытанных пар образцов значения коэффициента трения на каждой частоте вращения по формуле:

$$f = \frac{4M}{N} (D + d), \quad (7.6.4)$$

где M — среднее значение момента сил трения образца на данной частоте вращения, Н·М; N — нагрузка на образцы в данной серии повторных испытаний, Н; D, d — соответственно нагруженный и внутренний диаметр образцов, мм.

10. По результатам испытаний строят график зависимости температуры и коэффициента трения от скорости скольжения с указанием нагрузки, при которой проводилось испытание.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Кинематическая схема и порядок работы установки УМТ-1.
3. График зависимости коэффициента трения и температуры от скорости скольжения [$f = \varphi(V)$ и $T = \varphi(V)$].
4. По данным из графиков $f = \varphi(V)$ и $T = \varphi(V)$ построить график $f = \varphi(T)$
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой принцип действия испытательной машины УМТ-1.
2. В чем заключается сущность метода оценки фрикционной теплостойкости материалов?
3. Как производят измерение момента трения и определение коэффициента трения?
4. По каким схемам можно проводить испытания на машине трения типа УМТ-1?
5. В каких случаях используется та или иная схема испытаний?

Рекомендуемая литература

[8], [9], [10], [109], [215], ГОСТ 23.210—80.

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы · Определение влияния твердости материала на интенсивность абразивного изнашивания.
 Определение влияния режимов нагружения на интенсивность изнашивания материалов.

Общие сведения

В данной лабораторной работе исследуется вид абразивного изнашивания, который имеет место при контактировании твердого тела с неподвижно закрепленными частицами абразива.

Для проведения испытаний используется машина трения типа МИ-2, которая позволяет:

- проводить испытания одновременно двух образцов;
- измерять силу трения при нагрузке в пределах от 20 до 100 Н;
- осуществлять многократное скольжение образцов по одному и тому же следу на плоскости абразивной шкурки;
- обеспечивать коэффициент взаимного перекрытия поверхностей трения равный $0,04 \pm 0,01$;
- проводить испытания со скоростью $0,3 \pm 0,05$ м/с;
- автоматически устанавливать число циклов взаимодействия поверхностей трения.

Схема машины трения МИ-2 представлена на рис 7.7.1.

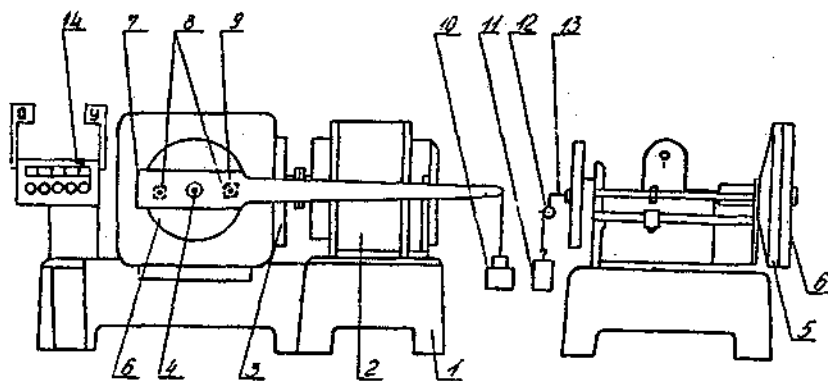


Рис. 7.7.1. Схема испытательной машины МИ-2

На станине 1 укреплен асинхронный двигатель трехфазного тока мощностью 1 кВт, 2, который через червячный редуктор 3, приводит во вращение полый вал 4, с насаженным на него диском 5. На диск 5 устанавливается абразивная шкурка 6, вырезанная в виде кольца с наружным диаметром 170 мм и внутренним диаметром 50 мм. Крепление абразивной шкурки 6 к диску 5 осуществляется шайбой, которая прижимается болтом, ввинчиваемым в осевое отверстие диска.

Неравноплечий рычаг 7 несет на себе две зажимные рамки 8 толщиной 3 мм, в которые помещаются держатели с образцами. При помощи винтов 9 держатели с образцами зажимаются рамками на рычаге. Посередине между зажимными рамками на рычаге 7 укреплен грузовой стержень 13, который проходит через полый вал 4 и служит для прижима рычага 7 с образцами к абразивной шкурке 6. Расстояние между центром каждого образца и осью стержня равно 68 мм. Прижим осуществляется грузом 11, подвешенным к стержню 13 при помощи стального троса, перекинутого через ролик 12. Длинное плечо рычага 7 имеет на конце отверстие для подвешивания уравновешивающего груза 10, служащего для удержания плеча в горизонтальном положении при вращении абразивной шкурки.

Для уменьшения колебаний рычага во время работы машины допускается пользоваться демпфером.

Потери на трение в самой испытательной машине учитываются постоянной величиной, способ определения которой обуславливается конструкцией машины.

Постоянной величиной машины K , является разность веса плеч рычага, определяемая во время движения диска машины без образцов и прижимного груза. Один из способов определения постоянной величины машины МИ-2 заключается в том, что убирают прижимной груз и снимают уравновешивающий груз; конец длинного плеча рычага соединяют с чашкой весов, а затем машину пускают в ход. Весы уравни-

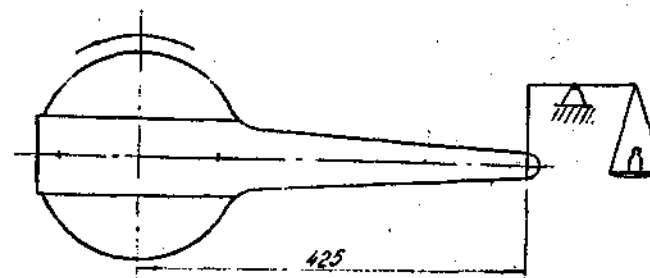


Рис. 7.7.2. Схема определения постоянной величины K машины МИ-2

вешивают при помощи грузов, помещаемых на вторую чашку весов, рис. 7.7.2. Вес уравновешивающих гирь, определяемых с точностью до 2 сН, представляет собой искомую постоянную величину машины К. Постоянную величину машины измеряют перед проведением испытаний.

Установка числа циклов взаимодействия поверхностей трения или числа оборотов диска *S* производится счетчиком 14. Счетчик имеет два рычага с маркировкой “Д” и “У”. При повороте рычага “У” необходимое число оборотов диска набирается нажатием соответствующих кнопок, расположенных у соответствующего цифрового разряда.

После установки числа оборотов диска рычаг “У” возвращается в исходное положение и поворачивается рычаг “О” при этом происходит обнуление счетчика. При включении машины счетчик производит подсчет числа оборотов диска и при достижении набранного ранее значения автоматически отключает машину. Для повторного запуска машины следует снова произвести обнуление счетчика рычагом “О”.

Оборудование и принадлежности

Машина трения МИ-2, весы аналитические ВИА-200М, набор грузов, шлифовальная шкурка — ГОСТ 13344—79, группа маркированных образцов цилиндрической формы диаметром 1,0 см, высотой 1,5 см с различной твердостью поверхности трения. Материал образцов сталь 45, полиамид, ПЭВД, ПЭНД, СФД.

Порядок проведения работы

I. Определение влияния твердости на интенсивность абразивного изнашивания материалов

1. Определить в соответствии с разделом 4 постоянную величину машины К.

2. Взять пару образцов с минимальным значением твердости поверхности трения.

3. Вырезать из шлифовальной шкурки кольцо с наружным диаметром 170 мм и внутренним диаметром 50 мм.

4. Установить на металлический диск кольцо из абразивной шкурки и зафиксировать его в этом положении шайбой и болтом, вкручиваемым в осевое отверстие полого вала.

5. Установить выбранную пару образцов в держатели и затем закрепить держатели при помощи винтов в рамках на рычаге.

6. Поверхности трения образцов протереть хлопчато-бумажной тканью смоченной в ацетоне или гексане. Высушить их на воздухе в течении 2—5 минут.

7. Установить рычаг на машину трения. Установить груз массой 50 Н, прижимающий образцы к шлифовальной шкурке.

8. Подключить машину к сети трехфазного тока, включить кнопкой “Пуск” на передней части машины трение вращения диска.

9. Провести приработку образцов в течении 10...20 оборотов диска. Остановить вращение нажатием кнопки “Стоп”. Снять груз. Вынуть рычаг. Протереть образцы в соответствии с пунктом 6. Продукты изнашивания, не отделившиеся от образца по краям истирающей поверхности, следует удалить.

10. Если на всей поверхности трения обеих образцов есть следы изнашивания, то образцы вынимают из держателей и взвешивают на аналитических весах с погрешностью $\pm 0,001$ г. Результаты заносят в протокол испытаний. В противном случае приработку по пункту 9 повторяют.

11. Образцы снова установить в держатели. Обнулить показания счетчика числа оборотов. Задать нагрузку 50 Н и включить машину в соответствии с пунктом 6...7. Провести истирание образцов в течении 100 оборотов вала, предварительно установив на счетчике это значение.

12. Определить коэффициент трения при 100 оборотах диска после начала испытаний.

Для этого уравновешивают рычаг подвешиванием груза, подбирая его так, чтобы рычаг находился в равновесном горизонтальном положении.

Коэффициент трения *f* вычисляют по формуле:

$$f = F_{\text{тр}} / N, \quad (7.7.1)$$

где *N* — груз, прижимающий истирающиеся образцы к шлифовальной шкурке, в Н; *F_{тр}* — значение силы трения определяемое с учетом потерь на трение в самой машине по формуле:

$$F_{\text{тр}} = L(G + K) / r, \quad (7.7.2)$$

где *L* — расстояние от точки подвеса уравновешивающего груза до оси вращения рычага, в м; *G* — величина уравновешивающего груза, в Н; *K* — постоянная величина машины, в Н, определяемая в разделе 4; *r* — расстояние от центра образца до оси вращения рычага в м.

Рассчитанные значения коэффициента трения заносят в табл. 7.7.1.

13. По достижении диском 100 оборотов и автоматическом отклонении привода вращения снять прижимающий образцы груз. Извлечь из держателей образцы. Удалить продукты изнашивания с поверхности образцов в соответствии с п. 9. Взвесить образцы и занести результаты в таблицу 7.7.1.

Таблица 7.7.1

Номер образца	Твердость образца HRC (HB)	Величина уравнивающего груза $G, Н$	Коэффициент трения f	Масса образца до испытаний, г	Масса образца после испытаний, г	Износ образцов $\Delta m, г$	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^7$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

14. Оценить износостойкость и коэффициент трения для остальных пар образцов в соответствии с пунктами 2...13.

15. После окончания испытаний отключить питание машины от сети.

16. Рассчитать среднее значение интенсивности изнашивания, I_h по формуле:

$$I_h = \frac{\Delta m}{(\pi d)^2 n r \rho}, \quad (7.7.3)$$

где m — потеря веса в результате истирания образца, г; d — диаметр образцов, см; n — число оборотов диска; ρ — плотность образцов, г/см.

17. Построить графики зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента трения от твердости истираемых абразивом образцов.

II. Определение влияния режимов нагружения на интенсивность изнашивания материалов

18. Выбрать пять пар образцов одинаковой твердости.

19. Установить на машину первую пару образцов. Подготовить машину к испытаниям в соответствии с п.п. 5.3...5.8.

20. Провести приработку образцов с нагрузкой 10 Н по п.п.9...10.

21. Установить нагрузку на образцы 10 Н и провести испытания в соответствии с п.п. 11...13. Результаты испытаний занести в табл. 7.7.2.

Таблица 7.7.2

Номер образца	Нагрузка на образцы $N, Н$	Величина уравнивающего груза $G, Н$	Коэффициент трения f	Масса образца до испытаний, г	Масса образца после испытаний, г	Износ образцов $\Delta m, г$	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^7$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

22. Для остальных пар образцов провести последовательно испытания для нагрузок 20, 30, 40, 50 Н в соответствии с п.п. 19...21. Рассчитанные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания занести в табл. 7.7.2.

23. Построить графики зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента трения от нагрузки на истираемые абразивом образцы.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Кинематическая схема и порядок работы машины трения МИ-2.
3. Графики зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от твердости материала и нагрузки на образцы.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие механизмы абразивного изнашивания вам известны?
2. Назовите основные виды абразивного изнашивания.
3. Какой вид абразивного изнашивания реализован на машине МИ-2?
4. Какова зависимость интенсивности абразивного изнашивания от твердости металлов и полимеров?
5. Какова зависимость интенсивности абразивного изнашивания от режимов фрикционного нагружения?

Рекомендуемая литература

[8], [9], [10], [209], [210], [230], [231], [215], ГОСТ 11012—64, ГОСТ 11629—75.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕНЕТРАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

Цель работы Изучение метода и определение пенетрации пластичных смазок.

Общие сведения

Одним из основных показателей оценки эксплуатационных свойств пластичных смазок является вязкость. Для пластичных смазок вязкость зависит не только от температуры и давления, но и от скорости сдвига. С ростом скорости сдвига вязкость пластичной смазки снижается, вследствие разрушения скелета загустителя.

Так как для измерения вязкости пластичной смазки необходимы время и дорогостоящая аппаратура, в практических исследованиях оценивается пенетрация, не имеющая точного физического смысла, но связанная с вязкостью.

Пенетрация определяет консистенцию смазок.

При измерении пенетрации происходит сразу несколько явлений, потому что движение конуса в смазке вызывает упругопластические деформации и течение. Этим объясняется то, что две разные смазки могут иметь разные вязкости при близких пенетрациях.

Пенетрация характеризует смазку с точки зрения способности выдержать большое давление, сопротивляться выдавливанию из зоны между трущимися деталями и т.п.

Таблица 7.8.1. Деление пластичных смазок на классы по консистенции

Классы консистенции	Пенетрация при температуре 25° С
000	445—475
00	400—430
0	355—385
1	310—340
2	265—295
3	220—250
4	175—205
5	130—160
6	85—115

Пенетрация наиболее часто применяется среди показателей, характеризующих эксплуатационные свойства пластической смазки.

В соответствии с классификацией разработанной институтом смазки США (NLGJ), смазки по консистенции делятся на 9 классов (см. таблицу 7.8.1).

Устройство и принцип действия пенетromетра

Пенетрометр Ричардсона (рис. 7.8.1) состоит из основания 7 на котором закреплен столик 8. Основание треугольной формы имеет три регулировочных винта, которые позволяют отрегулировать горизонтальное положение столика и самого прибора.

Основание выполнено заодно со стойкой 6. В нижней части стойки 6 крепится рычаг с пусковой кнопкой 5. В отверстие рычага устанавливается плунжер на конце которого закрепляется корпус 1.

В верхней части стойки крепится циферблат 4 со стрелкой 3.

Стрелка 3 соединена с кремальеркой 2, которая во время испытания устанавливается на торец плунжера.

При испытании стакан смесителя (рис. 7.8.2) устанавливают на столик 8 пенетрометра. Корпус 1 закрепляют в плунжере. Опускают кремальеру 2 до соприкосновения с торцом плунжера. Устанавливают стрелку циферблата на отметку нуль.

Одновременно пускают секундомер и нажимают пусковую кнопку 5 пенетрометра, давая конусу свободно погружаться в смазку в течение 5 с, после чего отпускают кнопку. Затем снова опускают кремальерку до соприкосновения с плунжером и повторяют эксперимент.

Фиксируют перемещение стрелки.

Конус 1 (рис. 7.8.3) изготовлен из коррозионно-стойкой латуни или стали со съёмным наконечником из твердой стали.

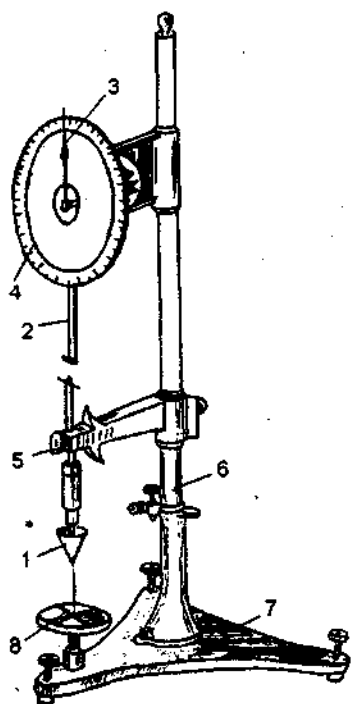


Рис. 7.8.1. Пенетрометр Ричардсона

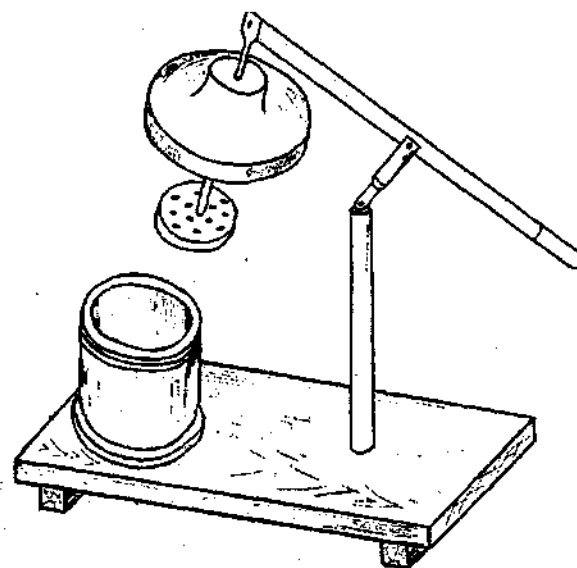


Рис. 7.8.2. Смеситель

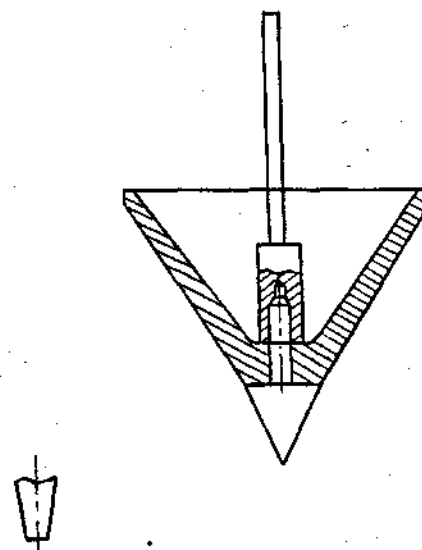


Рис. 7.8.3. Конус пенетрометра

Подвижная часть представляет собой жесткую ось со стопором в верхней части и устройства для закрепления конуса в нижней части.

Внешняя поверхность должна быть тщательно отполирована.

При исследовании небольших объемов смазки измерение производится миниатюрным конусом — определяют микропенетрацию.

Оборудование и принадлежности

Пенетромтр Ричардсона с конусом, смеситель к пенетромтру, водяная баня с крышкой, нож, шпатель, термометр, секундомер, испытываемая смазка, обтирочный материал, смазка пластичная разных наименований (не менее двух).

Порядок проведения работы

Сущность метода заключается в определении глубины погружения в испытываемую смазку стандартного конуса за 5 с и при 25 °С при общей нагрузке 150 г, выражаемой целым числом десятых долей миллиметра по шкале пенетромметра.

1. Ознакомится с устройством и принципом действия пенетромметра Ричардсона.

2. Выбрать порядок определения пенетрации.

Примечание: 1. Пенетрацию определяют после механической обработки (перемешивания) пластичных смазок или без перемешивания. 2. Перед приготовлением образцов, смазку следует выдерживать при комнатной температуре не менее 10 ч. 3. Для смазки с пенетрацией менее 200 готовят один образец, с пенетрацией более 200 — пять образцов. Для одного образца берут 250—300 г смазки.

3. При определении пенетрации с перемешиванием, в стакан смесителя загружают вмазыванием испытываемую смазку в таком количестве, чтобы она заполнила весь объем стакана и выступала в виде шарового сектора с высотой 15 мм. При вмазывании смазки необходимо следить, чтобы в ней не осталось карманов воздуха.

4. После заполнения испытываемой смазкой стакана смесителя закрывают плотно крышку и погружают стакан в водяную баню в которой его выдерживают в течении 1 часа при температуре 25,5° С. Следят чтобы жидкость (вода) в бане покрывала его полностью, включая и крышку, но не более чем на 10 мм ниже отверстия в крышке, через которое проходит шток диска.

5. По истечению срока выдерживания стакан вынимают из водяной бани, прикрепляют его к подставке, а рукоятку смесителя к рычагу и приступают к перемешиванию смазки.

Перемешивание смазки производят путем переменного поднятия и опускают рукоятку смесителя 60 раз в течение 1 мин.

6. После перемешивания смазки отвинчивают крышку и снова погружают открытый стакан смесителя в водяную баню на 15 мин. при температуре испытания 25 °С и на 30 мин — при более высокой температуре. Стакан погружают так, чтобы жидкость в ванне достигла резьбы стакана, но не была выше его края.

7. Стакан с приготовленным образцом помещают на столик пенетромметра (поверхность столика должна быть строго горизонтальна) и приступают к замерам.

Примечание: необходимо начать измерения сразу по окончании приготовления образца во избежании изменения консистенции смазки.

8. При испытании перемешанного образца, если ожидаемое значение пенетрации менее 200, измерения производят в точках, находящихся на половине радиуса окружности стакана на угловом расстоянии 120 друг от друга.

9. При испытании неперемешанного образца, если ожидаемое значение пенетрации будет 200 или выше, измерения проводятся в центре окружности стакана. Испытания проводят на пяти образцах, приготовленных аналогичным образом.

10. При испытании перемешанного образца измерение проводят аналогично определению пенетрации без перемешивания с той разницей, что конус пенетромметра устанавливают на середину стакана для испытаний. Последующие измерения проводят сразу после первого измерения на том же образце. Перед следующим измерением поверхность смазки выравнивают, замазывают, не подвергая ее механической обработке.

11. Конус устанавливают так, чтобы наконечник касался поверхности смазки, при этом конус не должен касаться стенок стакана.

Перед каждым испытанием конус тщательно очищают. Во время чистки конус должен занимать самое высокое положение.

12. После установки конуса опускают кремальерку до соприкосновения с плунжером, в котором закреплен хвостовик конуса и ставят стрелку циферблата на нуль.

13. Пускают секундомер и нажимают пусковую кнопку, давая корпусу свободно погружаться в смазку в течение 5 с, после чего отпускают кнопку. Затем снова опускают кремальеру до соприкосновения с плунжером. При этом вместе с кремальерой передвигается и стрелка на циферблате.

14. После отсчета показаний на шкале циферблата приподнимают кремальеру и плунжер с корпусом, тщательно очищают от смазки

обтирочным материалом, подготовив таким образом пенетромтр к повторному испытанию.

15. Повторить испытание пять раз.
16. Оформить отчет.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткое описание, принцип действия пенетромтра Ричардсона.
3. Сущность метода проводимых испытаний.
4. Для каждого типа используемой пластичной смазки определить число пенетрации.
5. Определить для каждой выбранной пластичной смазки среднее арифметическое число пенетрации.
6. По таблице для испытуемых смазок установить класс консистенции.
7. Сравнить результаты. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое пенетрация?
2. Какие свойства пластичных смазок оценивает число пенетрации?
3. В чем заключается принцип работы пенетромтра Ричардсона?
4. Как классифицируют пластичные смазки?

Рекомендуемая литература

[10], [168], [200], [201], ГОСТ 5346—78.

Лабораторная работа № 9

ОЦЕНКА РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы — Определение зависимости вязкости смазочных материалов от температуры на консистометре.

Общие сведения

Разнообразное применение смазочных материалов определяет необходимость существования системы оценок их эксплуатационных свойств. Наиболее важными из них для жидких и пластичных смазок являются реологические свойства. Реологические свойства масел характеризуются прежде всего вязкостью. Она зависит от температуры и давления.

Вязкость оценивается величиной μ , называемой динамической вязкостью, размерность которой Па·с. На практике используется величина динамической вязкости, сантипуаз (сП), равная $1 \cdot 10^{-3}$ Па·с. При производстве масел чаще пользуются, так называемой, кинематической вязкостью ν . Она представляет собой отношение динамической вязкости к плотности и имеет размерность $\text{м}^2/\text{с}$. Кинематическая вязкость измеряется в стоксах (Ст), однако чаще пользуются величиной 100 раз меньшей — сантистоксом (сСт).

Для пересчета кинематической вязкости в сантистоксах в динамическую в сантипуазах пользуются следующей зависимостью:

$$\mu = \rho \nu, \quad (7.9.1)$$

где ρ — плотность масла, $\text{г}/\text{см}^3$, при данной температуре.

Вязкость масел измеряют:

- капиллярными стеклянными вискозиметрами типов ВПЖ-1, ВПЖ-2, ВПЖ-4, ВНЖ, ВПЖН, АКВ-2 и АКВ-4, типа Освальда-Пинкевича;
- реометрами типа Ферранти-Ширли;
- реотестами типа RV;
- консистометрами, в том числе типа Хеплера.

В некоторых случаях при выборе пластичных смазок пользуются коэффициентом тиксотропии, выражаемым отношением максимальной структурной вязкости до разрушения к минимальной структурной вязкости после окончания механического воздействия.

Оборудование и принадлежности

Консистомер типа Хеплера, секундомер, набор исследуемых смазочных материалов.

Устройство и принцип действия консистомера Хеплера

Консистомер Хеплера предназначен для измерения вязкости чисто вязких (ньютоновских) жидкостей, исследования вязкости и аномалий текучести структурно-вязких (неньютоновских) жидкостей.

Принцип действия консистомера Хеплера состоит в определении времени, в течении которого стеклянный шар под действием приложенного груза погружается в исследуемую смазку.

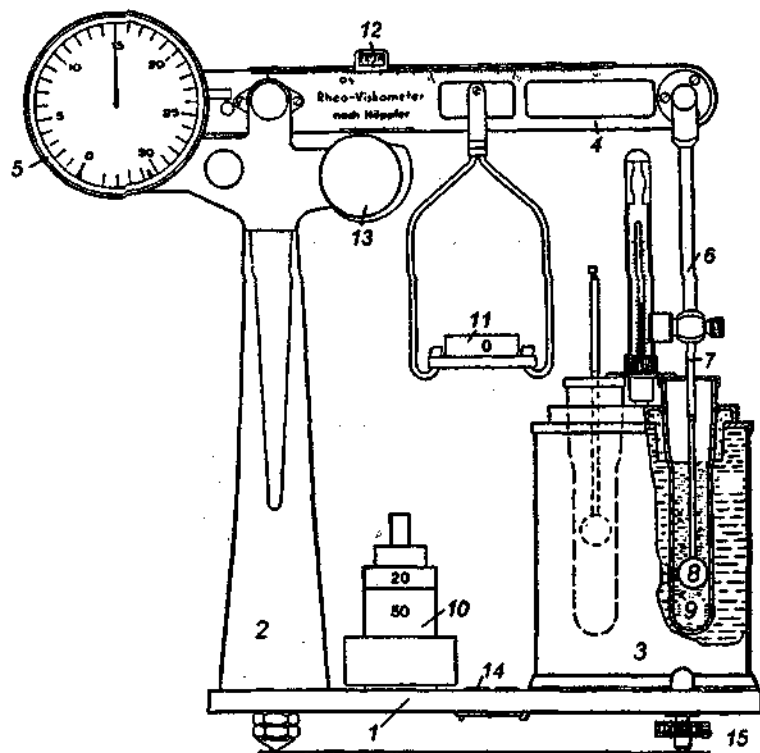


Рис. 7.9.1. Общий вид консистомера Хеплера

Консистомер (рис. 7.9.1) состоит из плиты 1, на которой закреплена стойка 2 и термостатируемая измерительная ячейка 3. На стойке 2 закреплено в подшипниках коромысло 4 и индикатор перемещения коромысла 5. Коромысло с одного конца взаимодействует с индикатором, а с другой стороны через шток 6 задает перемещение стержню 7 на конце которого закреплен стеклянный шарик 8. Перемещение стержня с шариком производится в мерном сосуде 9, который установлен в термостатируемую измерительную ячейку 3.

Необходимое напряжение сдвига задается грузами 10, устанавливаемыми на чашку 11. Для компенсации выталкивающей силы, действующей со стороны измеряемой смазки на шарик 8 используется подвижная гиря 12, скользящая по верхнему краю коромысла 4.

Погружение и подъем шарика производится кулачковым механизмом 13. Для установки горизонтального положения плиты 1 служит уровень 14 и винты 15.

Диапазон измерения вязкости ньютоновских жидкостей при температуре от -60 до 120 °C составляет $4 \dots 4 \cdot 10^6$ сП.

Точность измерения: $\pm 1 \dots 2\%$ сообразно с пределом измерения.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с принципом действия и устройством консистомера Хеплера.
2. Мерные сосуды и стержни с шариком протереть тампоном, смоченным в бензине и просушить струей сухого воздуха, свободного от механических примесей.
3. Наполнить мерный сосуд с показателем 0,01 измеряемой смазкой и поместить его в измерительную ячейку.
4. При помощи термостата задать температуру в измерительной ячейке 25 °C.
5. Закрепить стержень с шариком на штоке и опустить его в мерный сосуд.
6. Перемещением гири по верхней поверхности коромысла в положение соответствующее плотности смазки добиться компенсации подъемной силы.
7. Установить на чашку коромысла груз, соответствующий напряжению сдвига 80 г/см.
8. Кулачковым механизмом освободить коромысло, одновременно включив секундомер.
9. После того как шар пройдет расстояние 30 мм, определяемое по индикатору, остановить секундомер.

10. Поворотом кулачкового механизма вернуть коромысло в исходное состояние.

11. Записать полученные показания времени в таблицу 7.9.1.

Таблица 7.9.1

№ опыта	Время погружения шара t , с			
	Напряжение сдвига P , г/см ²			
	80	40	20	10
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее арифметическое времени погружения \bar{t}				
Произведение среднего арифметического времени погружения на напряжение сдвига $\bar{t} \cdot P$				

12. Повторить испытания по п.п. 8...11 5 раз.

13. Установить на чашку последовательно грузы соответствующие напряжению сдвига 40, 20 и 10 г/см² и провести испытания в соответствии с п.п. 8...12.

14. Вычислить среднее арифметическое значение времени погружения шара для различных значений сдвигового напряжения. Вычислить произведение средних арифметических значений времен погружения шара на соответствующие значения напряжений сдвига. Динамическая вязкость смазки определяется по формуле:

$$\mu = PtK \text{ [сП]}, \quad (7.9.2)$$

где P — напряжение сдвига в г/см² (указано на грузах); t — время в секундах прохождения шаром пути 30 мм; K — константа мерного сосуда равная 0,00957.

15. Вычислить среднее арифметическое значение произведений $\bar{t} \cdot P$ из таблицы и, умножив полученное значение на K согласно формуле (7.9.2), получить величину динамической вязкости μ .

16. Провести испытания по п.п. 7...15 при температурах в измерительной ячейке 50, 75 и 100 °С.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Устройство и схема действия консистометра Хеплера.
3. Порядок определения зависимости динамической вязкости от температуры смазочного материала.
4. График зависимости динамической вязкости от температуры смазочного материала.
5. Выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность метода определения динамической вязкости с помощью консистометра Хеплера?
2. Приведите формулу определения динамической вязкости на приборе типа консистометра Хеплера.
3. Что характеризует динамическая вязкость смазочного материала?
4. Как определяется коэффициент тиксотропии пластичных смазок?
5. С помощью каких приборов определяется кинематическая вязкость смазочных материалов?
6. Приведите формулу для пересчета динамической вязкости в кинематическую.
7. Как зависит вязкость смазочных материалов от температуры?

Рекомендуемая литература

[10], [100], [148], [213], ГОСТ 7163—63, ГОСТ 19295—73.

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ И РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОСИСТЕМ

Цель работы — Определение пригодности к эксплуатации моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем.

Общие сведения

Своевременная замена масел и рабочих жидкостей увеличивает срок службы трущихся деталей двигателей и гидроаппаратуры.

В процессе работы двигателей и гидросистем моторные масла и гидравлические жидкости подвергаются окислению и полимеризации под действием кислорода воздуха и температуры на поверхностях трения. Процесс окисления и полимеризации масел характеризуется накоплением примесей, состав, структура и свойства которых различны. Накапливаемые примеси оказывают влияние на механизм изнашивания, который характеризуется окислительным, коррозионным и абразивным видами.

Контроль качества масел осуществляется периодически путем отбора проб из картера двигателя и гидросистемы, их фотометрирования и сравнения оптической плотности с браковочным показателем. При достижении оптической плотности масла браковочного показателя необходимо произвести замену масел. Организация службы диагностики моторных масел и рабочих жидкостей включает составление графика отбора проб из механизмов всего парка. В начале применения контроль масел производится для всех машин и механизмов. В графике отражаются результаты фотометрирования масел. По разнице между браковочным показателем и оптической плотностью испытуемого масла планируется очередное проведение контроля. Таким образом, весь парк машин согласно результатов фотометрирования распределяется по определенным числам месяца. Задача службы диагностики заключается в своевременном проведении контроля масел в механизмах, которые запланированы в графике. Замена масел производится при достижении оптической плотностью значения браковочного показателя. Предложенная система позволяет иметь картину текущих значений работоспособности масел всех механизмов парка машин, вести учет расхода масла для каждого механизма, что

косвенно характеризует его техническое состояние, исключить слив доброкачественных масел и планировать расход масел. Ежеквартально по результатам фотометрирования масел и их расходу производится анализ и выявляются механизмы с повышенным расходом масла и скоростью загрязнения, которые подвергаются проверке для выявления технических неисправностей. Организация службы диагностики масляных систем предусматривает стационарный и мобильный варианты использования прибора в зависимости от специализации и специфики работы техники. Отбор проб масел включается в регламентные работы по ежесменному обслуживанию машин. Последовательность отбора проб масла заключается в следующем: первая проба — после замены масла при техническом обслуживании и работы двигателя с гидроприводом не менее 10—15 мин; последующие пробы отбираются через промежутки времени, определяемые результатом фотометрирования их на приборе. Периодичность отбора проб устанавливается экспериментально и за период между техническими обслуживаниями машины не должна превышать 3—4. Работоспособность моторных масел и рабочих жидкостей не имеет четкой зависимости от наработки часов, т.к. определяется индивидуальными факторами, к которым относятся: условия и режимы работы механизма; его техническое состояние и конструктивные особенности; производительность системы очистки; чистота и объем доливаемого масла, а также наличие воды в сазочном материале. Данные факторы оказывают существенное влияние на скорость загрязнения масел. Поэтому при одинаковом времени наработки количество примесей в масле будет различно. Применение прибора «Анализатор масла АМ-2к» позволяет вести контроль за степенью загрязнения масла и по достижении браковочного показателя производить его замену. Учитывая индивидуальные особенности каждого двигателя и различия в режимах и условиях эксплуатации достижение браковочного показателя происходит через различный промежуток времени. Поэтому применение прибора позволяет корректировать сроки службы масел. Основной задачей в эффективном применении прибора является согласование сроков замены масел, установленных путем фотометрирования с инструктивными. В практике применения приборов встречается три случая, когда время замены, установленное прибором путем фотометрирования меньше, равно или больше инструктивного срока. В том случае, когда время замены, установленное прибором, меньше или равно инструктивному, необходимо провести замену масла. В случае, когда инструктивный срок службы масла истек, а по показанию прибора масло пригодно к эксплуатации, что наблюдается в основном для изношенных двигателей, необходимо учитывать разность между брако-

вочным показателем и результатом фотометрирования. Если разность между браковочным показателем и показателями прибора составляет до 20...30 ед., то замену масла необходимо передвинуть до достижения браковочного показателя. При этом техническое обслуживание переносится и совмещается с заменой масла. Однако удлинение срока службы масел не должно превышать 10 рабочих дней. При разности между показателями более 30 ед. машина ставится на техническое обслуживание без замены масла, однако при этом производится замена фильтрующих элементов. Предложенная система замены масла предполагает на графике отбора проб планировать дату инструктивной наработки часов, что облегчает принять правильное решение по замене масел. При постановке машины на техническое обслуживание к числу регламентных работ относится замена масла в двигателе и гидросистеме. Замена рабочей жидкости производится значительно реже, чем моторных масел, что вызвано спецификой ее старения. Качество проведения техобслуживания контролируется прибором по результатам анализа двух проб масел. Первой — перед сливом масла из картера двигателя и гидросистемы и второй — после залива чистого масла. Пробы моторного масла отбираются из картера прогретого и работающего двигателя, а рабочих жидкостей с гидробака. Пробы масла отбираются после хорошего перемешивания его в масляной системе. Допускается отбор проб после 10—15 минутной работы двигателя и гидронасоса. Фотометрирование первой пробы характеризует степень загрязнения сливаемого масла, а второй пробы — качество проведения замены масла и степень загрязнения масляной системы двигателя и гидросистемы (картер, маслопроводящие каналы, фильтры и т.д.). Чем меньше оптическая плотность масла, тем качественней проведена замена масла и техническое состояние масляных систем удовлетворительное. Если при проведении замены масла установлена большая его оптическая плотность, то масляная система двигателя загрязнена. В этом случае необходимо провести промывку масляной системы, так как это ухудшает качество очистки и уменьшает срок службы масла, а в конечном счете и срок службы двигателя.

Устройство и принцип действия прибора “Анализатор масла АМ-2к”

Прибор “Анализатор масла АМ-2к” предназначен для одновременного контроля моторных масел и гидравлических жидкостей и является основным элементом в службе диагностики при эксплуатации различного рода двигателей внутреннего сгорания и гидросистем.

В основу работы прибора положен метод оценки степени загрязненности масел и гидравлических жидкостей по их оптической плотности.

При разработке метода был использован закон Бугера-Ламберта-Бера, который выражается следующей зависимостью:

$$D = \varepsilon_{\lambda} c l, \quad (7.10.1)$$

где ε_{λ} — молярный коэффициент поглощения [м^{-1}]; c — концентрация примесей; l — толщина фотометрируемого слоя, [м].

Величина оптической плотности D , определяется из выражения:

$$D = \frac{I_{\Phi}}{I_{\text{М}}}, \quad (7.10.2)$$

где I_{Φ} — фототок, генерируемый световым потоком, прошедшим через оптический канал прибора при отсутствии масла; $I_{\text{М}}$ — фототок, генерируемый световым потоком, прошедшим через прибор при наличии в нем слоя масла.

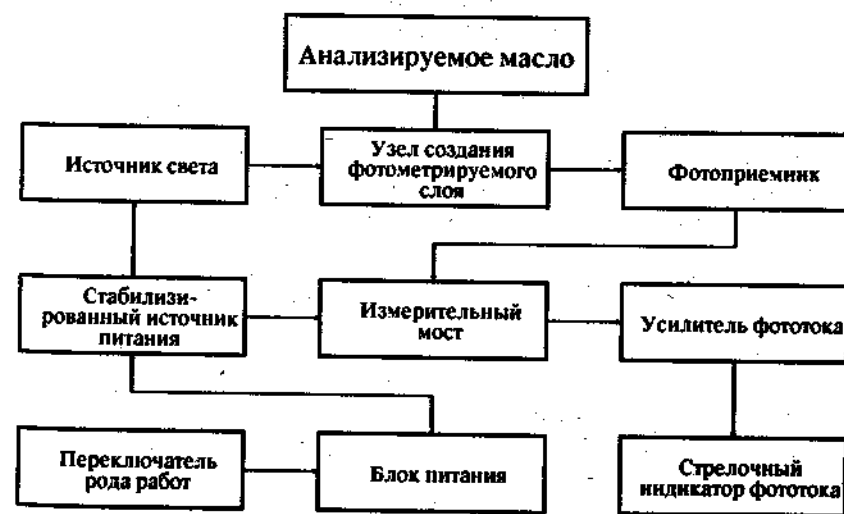


Рис. 7.10.1. Блок-схема прибора “Анализатор масла АМ-2к”

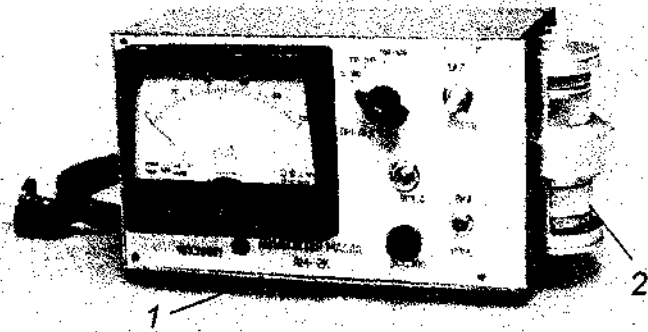


Рис. 7.10.2. Общий вид прибора:
1 — механический блок; 2 — измерительный блок

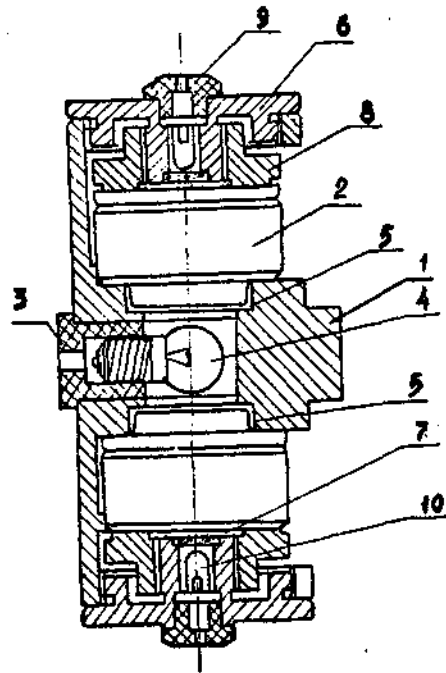


Рис. 7.10.3. Механический блок

Для удобства пользования прибором величина I_{ϕ} в формуле (7.10.1) при определении оптической плотности принята постоянной и задается электрической схемой. Применение стабилизатора напряжения для источника света обеспечивает получение стабилизированного светового потока, который генерирует в фотоприемнике фототок, усиливаемый дифференциальным усилителем и регистрируемым стрелочным индикатором. В зависимости от степени загрязнения масла на фотоприемник попадает различный световой поток, возбуждающий в нем соответствующий ток. Принципиальная блок-схема приведена на рис. 7.10.1.

Конструктивно прибор (рис. 7.10.2) состоит из измерительного 1 и механического 2 блоков.

Механический блок (рис. 7.10.3) состоит из полого корпуса 1, выполненного с двумя щелевыми отверстиями для установки фотометрических кассет 2. Корпус 1 разделен перегородкой, выполненной с двумя взаимно перпендикулярными отверстиями. В боковом отверстии установлена втулка 3 с источником света 4. На торцах другого отверстия установлены светофильтры 5. На торцах корпуса 1, имеются крышки 6, каждая из которых выполнена с центральным отверстием, в котором вмонтировано стекло 7. На выступающей резьбовой части крышки установлен маховичек 8, осуществляющий фиксацию кассет 2. В центральных отверстиях крышек 6 на одинаковом расстоянии от источника света 4 посредством втулок 9 размещены фотоприемники 10.

Фотометрическая кассета (рис. 7.10.4) предназначена для создания фотометрируемого слоя при фотометрировании масел. Она состоит из корпуса 1, крышки 2, резьбовой пробки 3 и стопорной шайбы 4. В корпусе 1 выполнено боковое отверстие 5 для слива избыточного масла при создании фотометрируемого слоя. Резьбовая пробка 3 выполнена с конической торцевой частью и цилиндрической полостью 6,

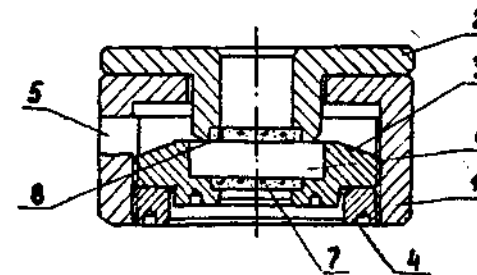


Рис. 7.10.4. Фотометрическая кассета

в нижнем торце которой установлено подвижное окно 7. Крышка 2 с отверстием и выступающей цилиндрической частью, на торце которой установлено неподвижное окно 8 установлена на торце корпуса 1 и выполнена съемкой. Одна из кассет настроена на толщину фотометрируемого слоя 0,15 мм, а другая на 4 мм для анализа соответственно моторных масел и рабочих жидкостей.

Измерительный блок включает стабилизатор источника света, дифференциальный усилитель фототока, измерительный мост, блок питания, силовой трансформатор, стрелочный индикатор типа М 906 и органы управления.

Оборудование, принадлежности, образцы

Прибор "Анализатор масла АМ-2к", пробы масел, взятые из работающих двигателей и гидравлических систем, бензин, ветошь, пипетка.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия "Анализатора масла АМ-2к".

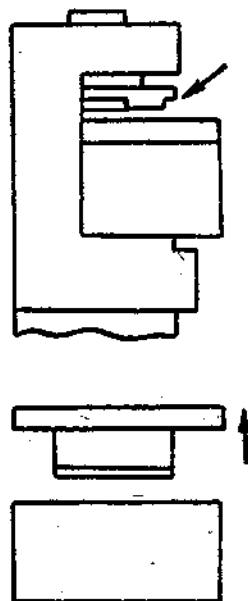


Рис. 7.10.5. Порядок демонтажа кассеты

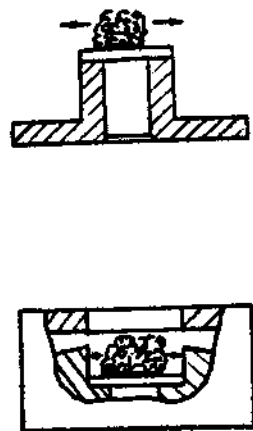


Рис. 7.10.6. Схема очистки стекол кассеты

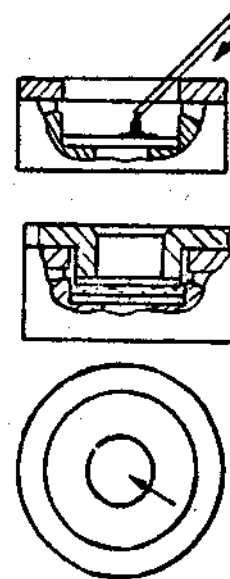


Рис. 7.10.7. Схема введения пробы анализируемого масла

2. Отвинтить маховичок и вынуть две кассеты из механического блока. Снять две крышки кассет, в соответствии с рис. 7.10.5.

3. Протереть стекла кассет сначала смоченной бензином, а затем сухой ветошью, как показано на рис. 7.10.6.

4. Закрыть крышки кассет, установить их в механический блок и зафиксировать маховичком.

5. Установить переключатель "Предел измерения" в положении "0—100".

6. Тумблер "Сеть" переключить в положение "Вкл". При этом должна загореться сигнальная лампочка.

7. Резистором "Уст 0" установить стрелку индикатора на нуль.

8. Установить переключатель "Предел измерения" в положение "200—300".

9. Нажать кнопку "Измерение", при этом стрелка индикатора должна установиться на делении 100. При необходимости произвести поднастройку резистором "Уст 300".

10. Отвинтить маховичок, вынуть кассету из верхней щели механического блока с толщиной фотометрируемого слоя 0,15 мм и снять крышку.

Таблица 7.10.1. Рекомендуемые показатели смены масла

Марка масла	Тип двигателя	Браковочный показатель по показанию прибора, мкА	Толщина фотометрируемого слоя, масла, мм
Зимняя М-8В ₂ М-8Г ₂	СМД-14	40	0,15
	Д-108		
	ЯМЗ-236		
	ЯМЗ-238		
	А-01М		
	Д-65Н		
Летняя М-10В ₂ М-10Г ₂	СМД-14	40	0,15
	Д-108		
	ЯМЗ-236		
	ЯМЗ-238		
	А-01М		
	Д-65Н		
М-8В	ГАЗ-24	130	0,15
	УАЗ-469		
М-8В	ЗИЛ-130	100	0,15
	ЗИЛ-133		
	ЗИЛ-131		
М-10Г ₂	КАМАЗ	10	0,15
Летняя МГ-30 Зимняя ВМГЗ Заменители: Летом И-30А Зимой АУ	ЭО-4221	30	4,0
	ЭО-4321		
	ЭО-3322		
	ЭО-4121		
	ЭО-5122		
	К-606		
	ЭО-5015		
Летняя Зимняя	ЭО-2621	30	4,0

11. Набрать пипеткой тщательно перемешанную пробу анализируемого моторного масла и нанести на стекло кассеты 2—3 капли.

Установить крышку кассеты и проверить однородность масляного слоя между стеклами согласно рис. 7.10.7. При наличии воздушных пузырей с помощью наклонного подъема и опускания крышки добить-

ся их удаления. Если удаление пузырей не достигнуто, операции 2, 3, 11 повторить.

12. Вставить кассету в механический блок и зафиксировать, завинчивая маховичок.

13. Нажать кнопку "Измерение" на 5...10 с и по стрелочному индикатору произвести отсчет показания, учитывая предел измерений на пределе измерения "0—100" показания считаются с микроамперметре, а для пределов "100—200" и "200—300" к показаниям микроамперметра необходимо соответственно добавить значения 100 и 200. Например, стрелка микроамперметра установилась на делении 40, а переключатель "Предел измерения" установлен в положении "100—200", тогда общее показание прибора равно 140 мкА. Если переключатель установлен на пределе "200—300", то общее показание составило бы 240 мкА.

14. Повторить п. 13 не менее пяти раз.

15. Определить оптическую плотность масла по формуле:

$$D = \lg \frac{300}{\Pi_{и} + K}, \quad (7.10.3)$$

где $\Pi_{и}$ — показания стрелки индикатора; K — предел измерений.

16. Определить среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации % и занести данные измерений в протокол испытаний.

17. Сравнить полученные измерения с допустимыми величинами оптической плотности (таблица) и сделать заключение о пригодности масла к дальнейшей эксплуатации в двигателе.

18. Промыть фотометрическую кассету с пробой моторного масла для чего снять верхнюю крышку кассеты вытереть масло со стекол кассеты ветошью, смоченной бензином, нанести 5—6 капель бензина на нижнее стекло, вытереть насухо оба стекла кассеты, собрать кассету и вставить в корпус механического блока. Включить тумблер "Измерение" и проверить установку стрелки индикатора на деление 100, при этом переключатель "Предел измерений" должен быть установлен на пределе "200—300", переключить переключатель "Предел измерений" в положение "0—100" и проверить установку стрелки на нуль.

19. Установить кассету для фотометрирования рабочих жидкостей с толщиной слоя 4,0 мм в верхнюю щель, а кассету для фотометрирования моторных масел с толщиной слоя 0,15 мм в нижнюю щель.

20. Провести оценку качества рабочей жидкости гидросистемы в соответствии с п. п. 5—18.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткое описание прибора "Анализатор масла АМ-2к".
3. Результаты измерений и вычислений оптической плотности моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем.
4. Выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Опишите систему службы диагностики моторных масел и рабочих жидкостей.
2. К какому типу трибологического оборудования относится "Анализатор масла АМ-2к"?
3. Каков принцип действия прибора "Анализатор масла АМ-2к"?
4. Укажите причины потери работоспособности масел и рабочих жидкостей гидросистем.
5. Как определяется качество моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем прибором типа "Анализатор масла АМ-2к"?

Рекомендуемая литература

[10], [100], [213].

Лабораторная работа № 11

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы — Определение смазочной способности масел температурным методом.

Общие сведения

Смазочные материалы, применяемые в современных машинах и механизмах должны соответствовать условиям работы узлов трения этих машин и механизмов. Поэтому особенно важна правильная оценка трибологических свойств смазок. Квалификационные достаточно простые лабораторные методы оценки позволяют решать задачи оценки функциональных свойств в данном случае трибологических свойств смазочных материалов.

Метод испытания смазочного материала характеризует тот или иной аспект их трибологического поведения: износостойкость, задиростойкость, антифрикционность.

Одним из наиболее часто используемых способов оценки триботехнических свойств смазочных материалов предлагает ГОСТ 23.221—84. Обычно его называют температурным методом оценки смазочной способности масел. Этот метод основан на представлении об определяющем влиянии температуры в тяжело нагруженном контакте на трибологические процессы и о наличии температур, характеризующих переходы от одной стадии процесса к другой, от одного типа изнашивания к другому. Экспериментальной основой метода являются испытания смазочных материалов при точечном или линейном контакте образцов с постоянной нагрузкой на узел трения, при постоянной и весьма малой скорости относительного перемещения образцов (во избежание фрикционного нагрева в контакте) и объемном нагреве узла трения вместе с исследуемым смазочным материалом от внешнего источника тепла. При этих условиях температура в контакте образцов практически не отличается от объемной температуры масла задаваемой специальным нагревателем. Температуру, как правило, повышают ступенчато, через 10—20 К.

По достижении заданной температуры реализуют процесс трения, затем температуру повышают до следующей ступени и цикл повторяется и так до предельной температуры испытаний.

Результаты эксперимента представляют в виде зависимости коэффициента трения от температуры (рис. 7.11.1). Эта зависимость

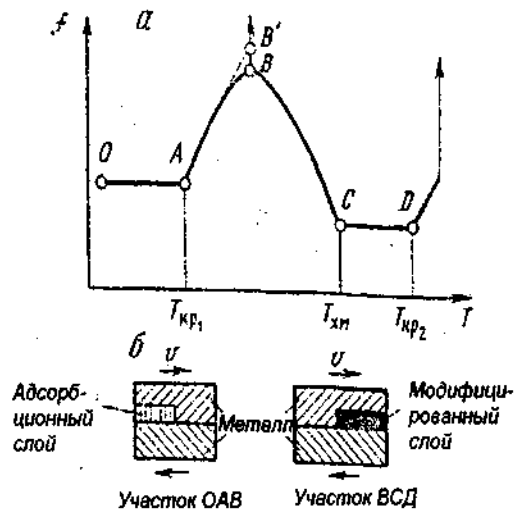


Рис. 7.11.1. График зависимости $f = f(T)$

для современных смазочных материалов характеризуется тремя переходными температурами: первой и второй критическими ($T_{кр1}$ и $T_{кр2}$), при которых имеет место переход к резкому увеличению коэффициента трения и интенсивному адгезионному изнашиванию, а также температурой химической модификации $T_{хм}$, при которой в результате химической реакции активных компонентов смазочного материала с поверхностями трения образуются химически модифицированные слои. Эти слои имеют пониженное сопротивление сдвигу и вследствие этого обеспечивают снижение трения и замену интенсивного адгезионного износа более мягким, коррозионно-механическим.

Первая критическая температура $T_{кр1}$ реализуется в результате конкуренции между процессами физической адсорбции и десорбции. Она возникает при превалировании процессов десорбции поверхностно-активных молекул смазочного материала и соответствует температуре при реализации давления P_x по ГОСТ 9490—75 и ограничивает работоспособность промышленных масел для нефорсированных двигателей внутреннего сгорания:

$$T_{кр1} = (E_x + \Delta\mu) / R \ln \left[B_1 \frac{P}{HB} C^{-n} V^{-m} \right], \quad (7.11.1)$$

где E_x — наблюдаемая энергия активации процесса образования металлических связей между контактирующими поверхностями; $\Delta\mu$ — разность химических потенциалов активных компонентов смазочного материала в граничном слое и в объеме; R — универсальная газовая постоянная; p — номинальное давление в контакте; HB — твердость по Бринеллю более мягкой из контактирующих поверхностей; C — концентрация активных компонентов; V — скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей; B , n и m — параметры уравнения.

Вторая критическая температура $T_{кр2}$ реализуется при конкуренции процессов образования и разрушения модифицированных слоев. Она имеет место при превалировании скорости изнашивания над скоростью образования этих слоев и соответствует приблизительно температуре при реализации P_x по ГОСТ 9490—75. $T_{кр2}$ ограничивает по температуре работоспособность трансмиссионных масел с химически активными присадками и масел для форсированных двигателей внутреннего сгорания:

$$T_{кр2} = (E_x - E_p) / R \ln \left[B_3 V^{m-y} C^{-n} \frac{P}{HB} \right], \quad (7.11.2)$$

где E_p — наблюдаемая энергия процесса химического модифицирования; B_3 , y и m — параметры уравнения.

$$T_{хм} = E'_p / R \ln \left[B_2 V^{-y} C^{-n} \left(\frac{HB}{P} \right)^y \right], \quad (7.11.3)$$

где E'_p — энергия активации процесса образования модифицированного слоя.

Константы приведенных уравнений для расчета переходных температур оцениваются из лабораторных исследований с использованием температурного метода оценки смазочной способности масел по ГОСТ 23.221—84. Основной сложностью является оценка значений B_1 , B_2 , B_3 , так как они зависят не только от сочетания смазочных и трущихся материалов, но и от геометрии контакта.

Принцип действия и конструкция машины МАСТ-1

Принцип действия машины трения типа МАСТ-1 состоит в определении величин износа и силы трения сферических образцов при изменении температуры в зоне трения внешним нагревом. В процессе

испытаний поддерживается постоянная контактная нагрузка и скорость скольжения.

Машина состоит из пульта управления, привода вращения, механизма нагружения, испытательной камеры с держателем образцов, системы измерения сил трения (рис. 7.11.2).

Вращение держателя верхнего образца передается от двигателя 1 через шкив 2, круглоремennую передачу, шкив 3, шпиндель 4. Нагружение осуществляется посредством двуплечего рычага 8 с отношением плеч 10:1. На одном плече рычага закреплена тарелка, на которую устанавливаются грузы. Второе короткое плечо рычага передает усилие на держатель нижних неподвижных образцов 11 последовательно через регулируемый опорный конус 5, иглу 6, ползу 7 и далее через упорный шарикоподшипник 8, стойку 9 и проставку 10.

Камера служит для нагревания образцов и испытываемого масла (рис. 7.11.3). Разогрев производится двумя электронагревателями 13 и 14, расположенными внутри керамического каркаса 15, установленного в корпусе 16 и закрытого кожухом 17. Испытательная камера крепится к основанию болтами 18.

Система измерения силы трения включает механический и электронный блоки. Момент трения, возникающий между верхним подвижным шариком и тремя неподвижными нижними шариками восп-

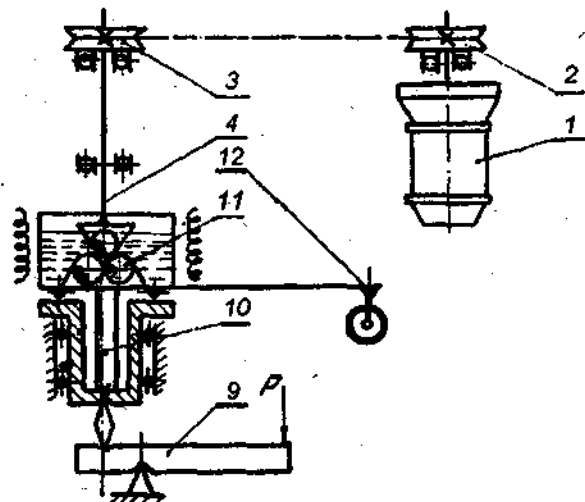
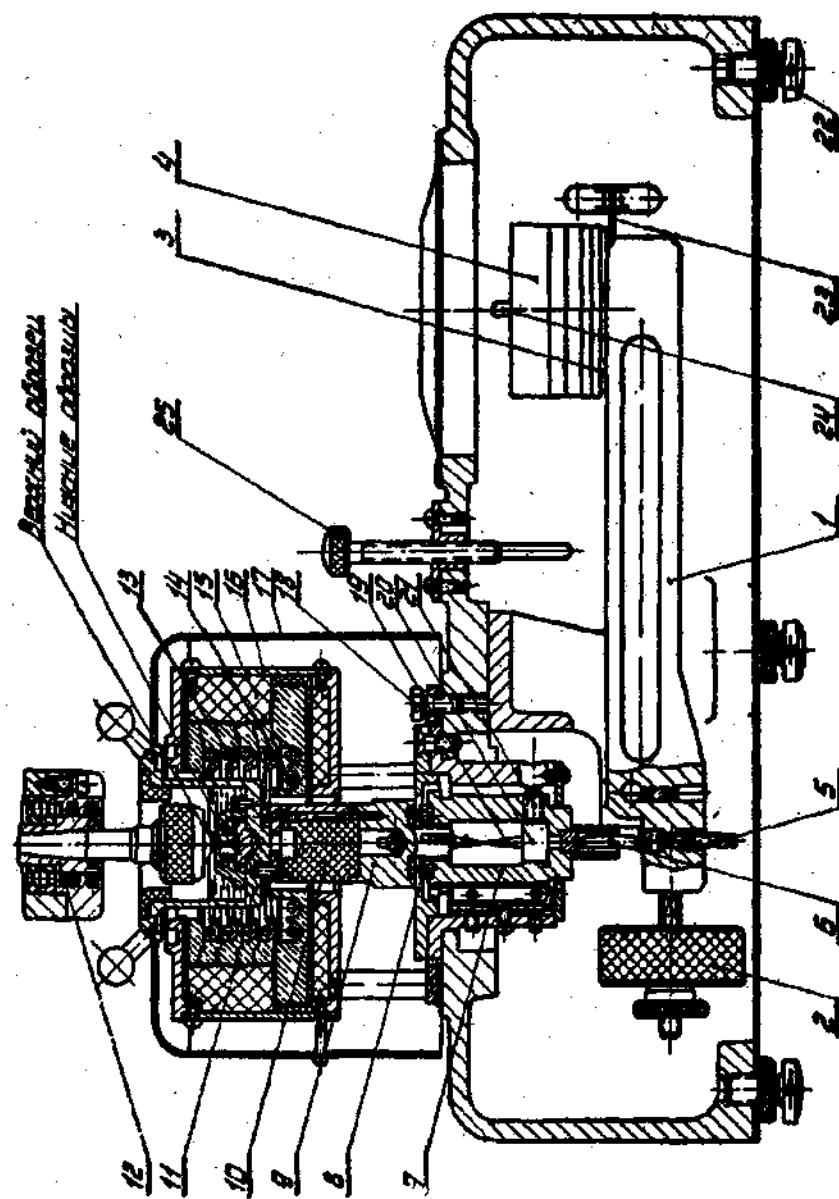


Рис. 7.11.2. Кинематическая схема машины МАСТ-1



Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Устройство и схема действия машины трения МАСТ-1.
3. Порядок определения зависимости коэффициента трения от температуры трения смазочного материала.
4. График зависимости коэффициента трения от температуры смазки.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность метода определения температурной стойкости смазочных материалов?
2. Дайте определение критической температуры $T_{кр}$ и температуры химической модификации $T_{хм}$.
3. Как определяются значения температур химической модификации $T_{хм}$ и критической температуры?
4. Как определяется величина условной энергии активации химической модификации (E)?

Рекомендуемая литература

[10], [146], [148], [215], ГОСТ 23.221—84.

Глава 8 СБОРНИК УПРАЖНЕНИЙ

Упражнение 1

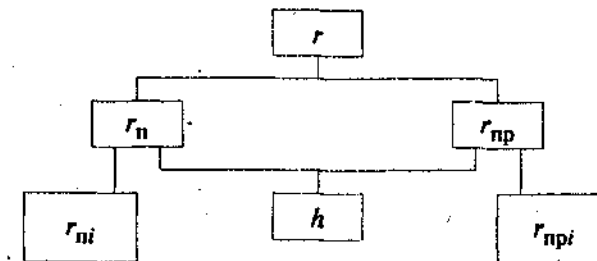
Рассчитать приведенный радиус кривизны вершин выступов, r рабочей поверхности подшипника скольжения, если горизонтальное увеличение γ_r для поперечной и продольной профилограммы составляет соответственно 500 и 1000, а вертикальное увеличение γ_b соответственно 1000 и 4000.

В табл. 8.1 представлены значения ширины сечений наиболее высоких выступов d_{ni} и d_{pri} , полученные в результате обмера соответственно продольных и поперечных профилограмм рабочих поверхностей трех подшипников.

Таблица 8.1

Номер подшипника	R_{max} , мм	Вид профилограммы	Ширина сечения выступов, d_{ni} и d_{pri} , мм											
			6	7	6	8	11	7	6	8	7	5	9	
1	40	Поперечная	6	7	6	8	11	7	6	8	7	5	9	
		Продольная	52	58	75	84	91	95	54	68	76	86	70	
2	35	Поперечная	4	3	7	4	5	6	8	7	5	4	3	
		Продольная	43	40	35	29	50	49	43	38	52	41	39	
3	60	Поперечная	9	11	8	13	10	7	12	11	9	10	14	
		Продольная	80	69	105	99	120	89	130	115	140	150	135	

Алгоритм решения



Расчетные зависимости

Приведенный радиус, r определяется из формулы:

$$r = \sqrt{r_n r_{np}}$$

Поперечный радиус r_n определяется из поперечной профилограммы, продольный r_{np} из продольной профилограммы по формуле:

$$r_{n(np)} = \frac{1}{k} \sum_1^k r_{n(np)i}, \text{ где } r_{n(np)i} = \frac{\gamma_B}{\gamma_T} \frac{d_{n(np)i}^2}{8h_i}$$

Число участков профилограмм k при определении r_n и r_{np} берется не менее 5. Ширина сечений d_{ni} и d_{npi} определена на расстоянии $h_i = 0,06 R_{\max}$ от вершины. Расстояние между линией вершин и линией впадин R_{\max} приведено в табл. 8.1.

Упражнение 2

По профилограммам, снятым с различных участков двух поверхностей, получены значения параметров шероховатости t_m, R_p, R_a, R_{\max} , представленные в табл. 8.2. Определить параметры опорной кривой ν и b .

Таблица 8.2

Номер поверхности	t_m	R_p , мкм	R_a , мкм	R_{\max} , мкм
1	0,50	3,2	1,41	6,5
	0,70	4,1	1,30	6,9
	0,49	3,0	1,32	7,1
	0,51	3,3	1,35	6,1
	0,55	3,5	1,35	6,3
2	0,53	3,6	1,42	6,5
	0,71	3,7	1,43	6,7
	0,73	4,0	1,36	6,9
	0,73	4,0	1,36	6,9
	0,61	3,0	1,42	7,0

Расчетные зависимости

Параметры опорной кривой ν и b рассчитываются по формулам:

$$\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b = t_m \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^\nu$$

в которые входят средние арифметические значения t_{mi} — относительной опорной длины на уровне средней линии; R_{pi} — расстояния от линии выступов до средней линии; R_{\max} — расстояния от линии впадин до линии выступов; R_{\max} — среднего арифметического из абсолютных значений отклонения профиля R_a .

Упражнение 3

Определить параметры опорных кривых ν и b поверхностей ряда деталей. Построить опорные кривые поверхностей деталей при относительном сближении $0 \leq \varepsilon \leq 0,5$.

Исходные данные представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Номер детали	Параметры микрогеометрии поверхности детали			
	R_a , мкм	R_p , мкм	R_{\max} , мкм	t_m
1	2,0	4,9	9,5	0,50
2	2,1	4,8	9,0	0,45
3	2,2	5,0	9,8	0,50
4	2,3	5,1	10,0	0,51
5	2,0	5,2	10,1	0,52
6	2,15	5,3	10,2	0,50
7	2,4	5,0	10,3	0,45

Расчетные зависимости

Опорные кривые поверхности деталей представляют собой графическое выражение зависимости относительной опорной длины профиля, t_p от относительного сближения ε , выражаемой формулой:

$$t_p = b\varepsilon^\nu$$

Расчет параметров опорной кривой поверхности b и ν проводится в соответствии с формулами, приведенными в упражнении 2.

Упражнение 4

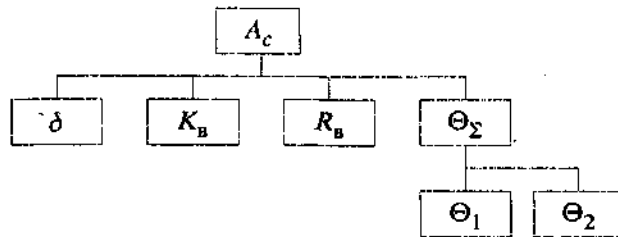
Рассчитать контурную площадь контакта A_c двух стальных поверхностей, у которых модуль упругости $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, коэффициент Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,4$, микротвердость $H_1 = H_2 = 100 \text{ кг/мм}^2$, шероховатость $R_{a1} = R_{a2} = 1,8 \text{ мкм}$.

Значения параметров волнистости, номинальной площади и нагрузки для 10 поверхностей приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Параметры поверхности		Значение параметров поверхности									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота волны, мкм	H_{a1}	10	15	18	20	16	25	19	21	17	16
	H_{a2}	20	20	25	18	21	30	24	27	22	24
Радиус волны, мм	R_{a1}	100	110	120	130	115	140	100	110	180	115
	R_{a2}	150	180	140	160	150	180	150	175	160	120
Номинальная площадь контакта $A_a, \text{ см}^2$		25	20	28	25	19	23	18	20	24	27
Нагрузка на контакт $N, \text{ кН}$		25	40	70	45	133	84	72	60	160	216

Алгоритм решения



Расчетные зависимости

Для заданного соотношения уровня шероховатости и волнистости $50 R_a \geq H_B$ деформируемые неровности, расположенные на вершинах волн оказывают влияние друг на друга. Контурная площадь контакта A_c в этом случае выразится уравнением:

$$A_c = 2,4 A_a K_B \left[\left(\frac{2R_B}{H_B} \right)^{1/2} \Theta_\Sigma P_a \right]^{3/(3+\delta)},$$

где Θ_Σ — угругая постоянная для двух деформируемых поверхностей $\Theta_\Sigma = \Theta_1 + \Theta_2$; упругая постоянная материала Θ определяется согласно формуле:

$$\Theta_{1(2)} = \frac{1 - \mu_{1(2)}^2}{E_{1(2)}}. \text{ Приведенный радиус волны, } R_B$$

определится из формулы:

$$R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}.$$

Высота волны H_B принимается равной меньшей высоте волны для данного сочетания поверхностей.

Коэффициенты δ и K_B для случая пластической деформации выступов $\frac{1}{\Theta_\Sigma H} < 50$ определяются в зависимости от значений R_a и H_B согласно формулам:

$$\delta = 0,5 + \left(\frac{5R_a}{H_B} \right)^{0,35}, \quad K_B = 1,1 + 0,45 \frac{5R_a}{H_B}.$$

Упражнение 5

Рассчитать фактическое давление P_r для контакта двух одинаковых стальных поверхностей, у которых $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$. Вид контакта — упругий ($R_a \leq 0,16 \text{ мкм}$).

Значения величин, характеризующих параметры микрогеометрии поверхностей и свойства материалов приведены в табл. 8.5.

Расчетные зависимости

Фактическое давление P_r для упругого контакта определяется из формулы:

$$P_r \approx \frac{0,61}{\Theta_\Sigma^{0,86}} \left(\frac{2R_{a\Sigma}}{r} \right)^{0,43} P_c^{0,14},$$

Таблица 8.5

Номер поверхности	R_a , мкм	$E \cdot 10^{-5}$, н/мм ²	P_c , н/мм ²	r_n , мкм	r_{np} , мкм
1	0,08	2,0	20	160	800
2	0,11	2,0	25	200	1000
3	0,09	2,0	40	150	700
4	0,08	2,0	45	140	800
5	0,10	2,0	50	120	900
6	0,09	2,5	60	140	1200
7	0,07	3,1	35	150	1000
8	0,09	3,0	45	160	800
9	0,12	2,5	75	180	900
10	0,09	2,0	100	200	800

где P_c — контурное давление; Θ_Σ — упругая постоянная для двух деформируемых поверхностей (см. упр. 4); r — приведенный радиус закругления вершин микронеровностей (см. упр. 2); $R_{a\Sigma} = R_{a1} + R_{a2}$.

Упражнение 6

Вычислить коэффициент трения в дисковой муфте сцепления с накладками из ряда композиционных материалов.

Исходные данные: номинальное давление — $P_a = 48$ Н/см², нажимной диск изготовлен из чугуна СЧ 21-40, твердостью HB = 200.

Параметры кривой опорной поверхности $b=3$, $\nu=2$, комплексная характеристика шероховатости, $\Delta = 4,9 \cdot 10^{-2}$.

Физико-механические и фрикционные свойства накладок приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Свойства материалов накладок	Номер накладки				
	1	2	3	4	5
Твердость HB _n	12	13	16	3,8	7,5
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, Н/мм ²	12,6	14,2	35,9	6,5	8,4
Касательные напряжения на границе раздела τ_n	0,372	0,195	0,091	0,114	0,152
Молекулярная составляющая коэффициента трения, f_m	0,091	0,065	0,085	0,080	0,088
Коэффициент Пуассона, μ	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5

Схема решения

В соответствии с формулой:

$$\frac{P_c}{HB_n} = \frac{0,5 \cdot 5,4^\nu}{\Delta^\nu} \left[\frac{HB_n (1 - \mu^2)}{E} \right]^{2\nu}$$

определяется контурное давление P_c .

Если полученное значение окажется меньше имеющего место в муфте номинального давления, то в зонах фактического контакта имеет место пластические деформации и коэффициент трения можно определять по формуле:

$$f = f_m + 0,44 \Delta^{0,5} \left(\frac{P_a}{HB_n} \right)^{0,25}$$

При условии сохранения внешнего трения, т.е. контурное давление, определяемое по формуле $P_c = \frac{0,125 HB_n}{\Delta^{2\nu}} \left(1 - \frac{6\tau_n}{HB_n} \right)^2$ должно быть больше номинального P_a .

Упражнение 7

Определить момент затяжки гаек различных фланцевых уплотнений, каждое из которых состоит из стальных деталей, стянутых болтом с усилием $Q = 800$ кгс.

Материал фланцевых соединений: стали — 15Х25Т, 09Х15Н8Ю, 40Х13, 14Х17Н2, 10Х11Н20ТЗР, 20ХВН4Г9.

Болты: М12×1,5, М14×1,5, М18×1,5, М20×1,5.

Материал гайки: сплав ВТ1.

Параметры шероховатости фланца — $R_a = 0,6 \dots 1,3$ мкм, $R_{max} = 10$ мкм, $r = 85$ мкм, $\nu = 1,2$, $b = 1,9$, комплексная характеристика шероховатости $\Delta = 0,06$.

Параметры шероховатости поверхности болта — $R_a = 0,3 \dots 0,5$ мкм, $R_{max} = 5,1$ мкм, $r = 14$ мкм, $\nu = 2$, $b = 1$, $\Delta = 0,35$.

Параметр шероховатости торцевой поверхности гайки: $R_a = 0,06 \dots 0,14$ мкм.

Вычислить нормальное давление на виток резьбы для первых шести витков по заданному процентному распределению нагрузки по виткам: 33%, 25%, 18%, 12%, 6%, 4%.

Молекулярная составляющая силы трения f_m для гайки — 0,08, для болта — 0,09.

Схема решения

Момент затяжки гайки, M складывается из момента трения в резьбе M_p и момента трения между торцом гайки и фланцем M_T .

Момент трения в резьбе определяется из формулы:

$$M_p = \sum_{i=1}^n M_{pi}$$

где M_{pi} — момент трения в i -ом витке, определяемый по формуле:

$$M_{pi} = f_{pi} Q_i \frac{d_{вн} + d_n}{4}$$

Момент трения между торцом гайки и фланцем определяется по формуле:

$$M_T = Q f_T \frac{D + d_n}{4}$$

где $d_{вн}$ и d_n — внутренний и наружный диаметр резьбы болта; D — диаметр опорной поверхности гайки.

Коэффициент трения в i -ом витке резьбы f_{pi} и между торцом гайки и фланцем определится по формуле (см. упр. 6)

$$f_{pi(\tau)} = f_m + 0,44 \Delta^{0,5} \left(\frac{P_a}{HB} \right)^{0,25}$$

где P_a — номинальное давление в фрикционном контакте.

Упражнение 8

Проверить работоспособность радиального подшипника скольжения в условиях полужидкостного трения при различных режимах фрикционного нагружения.

Исходные данные:

Материал вала — сталь 45, вкладыша — чугун АСЧ-5. Диаметр вала, $d = 150$ мм, длина подшипника 250 мм. Предельный фактор PV , $[PV] = 12$ МПа м с⁻¹.

Режимы фрикционного нагружения приведены в табл. 8.8.

Таблица 8.8

Угловая скорость вращения вала, ω , сек ⁻¹	12,5	16	20	25	33
Нормальная нагрузка на подшипник N , кН	80	90	110	200	50

Схема решения

Работоспособность подшипника скольжения при полужидкостном трении определяется фактором PV — произведением давления, оказываемого на подшипник на скорость его вращения. При достижении фактором PV предельного значения $[PV]$ происходит катастрофический износ поверхностей трения или заедание трибосопряжения.

Упражнение 9

Для различных уровней нагружения оценить работоспособность домкрата в зоне контакта резьбы гайки и винта.

Материал пары трения: винт — сталь 45 закаленная; гайка — бронза БрА9ЖЗЛ.

Исходные данные.

Осевые усилия N : 500 Н; 10000 Н; 15000 Н; 20000 Н; 40000 Н.

Параметры трапецидальной резьбы: наружный диаметр, $d_n = 44$ мм, внутренний диаметр $d_{вн} = 36$ мм; шаг резьбы $S = 8$ мм, высота гайки $H_T = 80$ мм.

Схема решения

Работоспособность пары трения винт—гайка определяется из условия сохранения в зоне фрикционного контакта смазки. Экспериментально установлено предельное значение номинального давления, при котором происходит выдавливание смазки из зоны трения, сопровождающееся катастрофическим износом резьбы. Оценка работоспособности заключается в сравнении давления, оказываемого на поверхность резьбы, с предельным давлением $[P] = 12...13$ МПа.

Упражнение 10

Оценить работоспособность радиального подшипника скольжения жидкостного трения при различных нагрузках N : 4000 Н; 5500 Н; 7000 Н; 9000 Н; 15000 Н.

Исходные данные.

Материал вала — сталь 45; вкладыша — бронза БрА9ЖЗЛ.

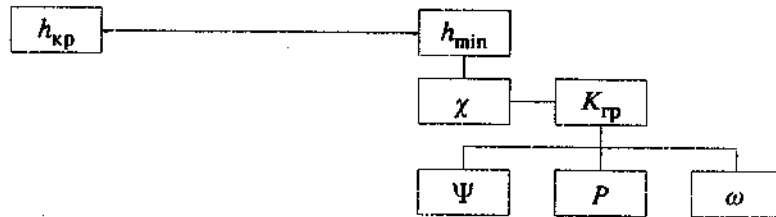
Размеры: диаметр вала — $d = 110$ мм; длина вкладыша — $l = 55$ мм; средний радиальный зазор — $\Delta = 140$ мкм.

Параметры шероховатости: вала — $R_{z1} = 3,6$ мкм; вкладыша — $R_{z2} = 8,0$ мкм.

Частота вращения вала — $n = 1000$ об/мин.

Смазочный материал — масло индустриальное И-Л-А-22. Кинематическая вязкость — $\nu = 19,0 \dots 25,0$ мм² · с⁻¹, плотность — $\rho = 920$ кг/м³.

Алгоритм решения



Нарушение работоспособности подшипника скольжения жидкостного трения возможна при достижении толщины слоя смазки, разделяющей трущиеся поверхности критической величины $h_{кр}$, равной сумме высот микронеровностей контактирующих поверхностей. Экспериментально установлено, что для сохранения режима жидкостного трения такого подшипника минимальная толщина масляного слоя, $h_{мин}$ должна превышать $h_{кр}$ в 1,3 раза.

Минимальная толщина масляного слоя $h_{мин}$ определяется из соотношения:

$$h_{мин} = \frac{\Delta}{2(1 - \chi)},$$

где χ — относительный эксцентриситет.

Величина χ определяется по коэффициенту гидродинамической реакции подшипника $K_{гр}$ из соотношения:

$$\chi = 0,3 K_{гр}.$$

$K_{гр}$ в свою очередь находится по формуле:

$$K_{гр} = \frac{P \Psi^2}{\eta \omega},$$

где P — давление в подшипнике, Н/м²; ω — угловая скорость вращения вала, сек⁻¹; $\Psi = \Delta/d$ — относительный зазор в подшипнике; η — динамическая вязкость масла, Па · с.

Упражнение 11

Произвести предварительную оценку износостойкости шлицевого соединения легкой серии со следующими номинальными размерами $d — 8 \times 36$ Н7/е8×40 Н12/а11×7D9/ф8 при различных случаях нагружения.

Исходные данные.

Крутящий момент: $T_1 = 400$ Нм; $T_2 = 500$ Нм; $T_3 = 600$ Нм; $T_4 = 700$ Нм; $T_5 = 800$ Нм. Удельный суммарный статический момент площади рабочих поверхностей соединения относительно оси вала $Z = 182$ мм². Рабочая длина соединения $l = 48$ мм. Общий коэффициент концентрации нагрузки $K_{изн} = 1,7$.

Допустимое напряжение шлицевого соединения по критерию износостойкости $[\sigma]_{изн} = 138$ МПа.

Схема решения

Оценка износостойкости шлицевого соединения состоит в сравнении напряжений σ , возникающих в шлицевом соединении от воздействия крутящего момента с допускаемым напряжением $[\sigma]_{изн}$, при котором происходит интенсивное изнашивание шлицевого соединения.

Действующие напряжения, σ определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{TK_{изн}}{Zl}.$$

Упражнение 12

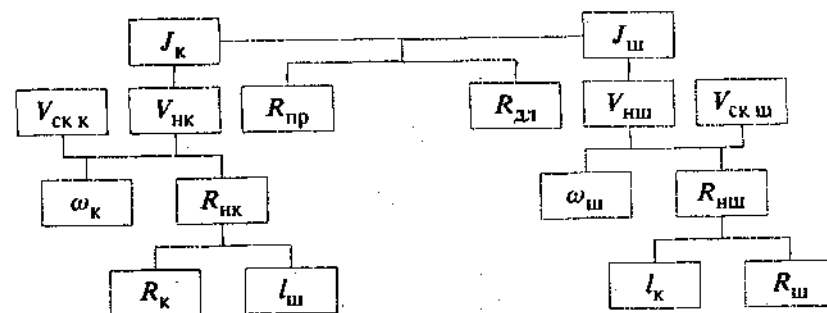
Для представленных ниже вариантов цилиндрических прямозубых передач с углом зацепления $\alpha = 20^\circ$ определить интенсивность изнашивания зубьев колеса, J_k и шестерни, $J_{ш}$. Передачи работают без смазки и выполнены из металлокерамики $E_k = E_{ш} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$.

Размеры передач, величины износа зубьев, число циклов нагружений представлены в табл. 8.12.

Таблица 8.12

Параметры передач	Значение параметров передач					
	1	2	3	4	5	6
Модуль передачи m	1,0	0,8	1,25	1,5	2,0	0,6
Число зубьев шестерни $z_{ш}$	22	30	24	28	35	25
Число зубьев колеса z_k	74	60	80	86	50	75
Ширина зуба b , мм	3	4	4,8	5	3,8	3,4
Диаметр начальной окружности шестерни $d_{ш}$, мм	22	24	30	42	70	15
Диаметр начальной окружности колеса d_k , мм	74	56	100	129	100	45
Межцентровое расстояние a_w , мм	48	40	65	85	85	30
Крутящий момент на валу зубчатого колеса $M_{кр}$, кг·см	3,5	4,2	5,1	5,5	6,5	6,2
Угловая скорость вала шестерни $\omega_{ш}$, об/мин	4000	3500	4500	4000	5000	5500
Износ зубьев шестерни $h_{ш}$, мм	0,31	0,25	0,38	0,28	0,33	0,30
Износ зубьев колеса h_k , мм	0,20	0,18	0,21	0,22	0,25	0,20
Число циклов нагружения:						
шестерни $N_{ш}$, 10^7	4,13	4,00	4,28	4,10	4,30	4,30
колеса N_k , 10^7	1,24	1,25	1,55	1,35	1,18	1,25

Алгоритм решения



Расчетные зависимости

Интенсивность изнашивания зубьев колеса J_k и шестерни $J_{ш}$ определится из формулы:

$$J_k = \frac{k_k V_{нк}}{2,25 [R_{дл} (\theta_1 + \theta_2) R_{пр} V_{ск к} N_k]^{1/2}},$$

$$J_{ш} = \frac{k_{ш} V_{нш}}{2,25 [R_{дл} (\theta_1 + \theta_2) R_{пр} V_{ск ш} N_{ш}]^{1/2}},$$

где $V_{нк}$ и $V_{нш}$ — скорости отстающих поверхностей в ножках зубьев колеса и шестерни, определяемые из соотношений

$$V_{нк} = \omega_k R_{нк} \text{ и } V_{нш} = \omega_{ш} R_{нш}.$$

Угловые скорости колеса и шестерни определяются из известных формул, а радиусы кривизны в ножках зубьев колеса $R_{нк}$ и шестерни $R_{нш}$ определяются по формулам

$$R_{нк} = R_n - l_{ш} \text{ и } R_{нш} = R_{ш} - l_k,$$

где радиус кривизны зубьев колеса

$$R_k = i R_{ш},$$

а радиус кривизны зубьев шестерни

$$R_{ш} = \frac{a_{\omega} \sin \alpha}{i + 1}.$$

Расстояние по линии зацепления колеса l_k определяется из формулы:

$$l_k = \frac{h_{гк}}{2} \left\{ \left[\left(\frac{d_k}{h_{гк}} \sin \alpha \right)^2 + 4 \left(\frac{d_k}{h_{гк}} + 1 \right) \right]^{1/2} - \frac{d_k}{h_{гк}} \sin \alpha \right\}.$$

Расстояние по линии зацепления шестерни $l_{ш}$ определяется из формулы:

$$l_{ш} = \frac{h_{гш}}{2} \left\{ \left[\left(\frac{d_{ш}}{h_{гш}} \sin \alpha \right)^2 + 4 \left(\frac{d_{ш}}{h_{гш}} + 1 \right) \right]^{1/2} - \frac{d_{ш}}{h_{гш}} \sin \alpha \right\}.$$

Высота головки зубьев колеса $h_{гк}$ и шестерни $h_{гш}$, передаточное отношение i и упругая постоянная материала определяются из известных соотношений.

Нагрузка на единицу длины контактной линии, $R_{дл}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{дл} = \frac{2M_{кр}}{bd_{ш} \cos \alpha}.$$

Приведенный радиус, $R_{пр}$ равен:

$$R_{пр} = \frac{R_{ш} R_k}{R_{ш} + R_k}.$$

Скорости скольжения в ножках зуба колеса $V_{скк}$ и шестерни $V_{скш}$ определяются по формулам:

$$V_{скк} = (\omega_{ш} + \omega_k) l_k \text{ и } V_{скш} = (\omega_{ш} + \omega_k) l_{ш}.$$

Упражнение 13

Рассчитать скорости абразивного изнашивания зубьев колес $J_{гк}$ и шестерни $J_{гш}$ прямозубого эвольвентного зацепления.

Характеристики закрытых зубчатых передач представлены в табл. 8.13.1, а параметры абразива, присутствующего в смазке в табл. 8.13.2.

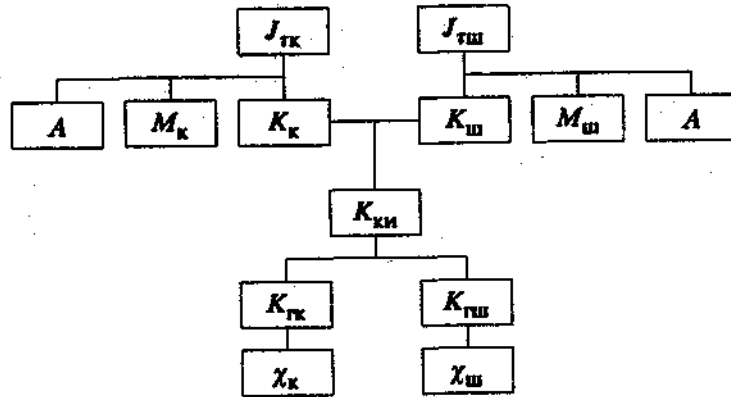
Таблица 8.13.1

Характеристики зубчатых передач	Вариант зубчатого зацепления					
	1	2	3	4	5	
Марка стали зубчатого колеса и шестерни	Сталь 65	Сталь 35	Сталь 40ХГС	Сталь 55	Сталь 75	
Число зубьев	колеса z_k	18	18	20	22	21
	шестерни $z_{ш}$	18	36	72	102	84
Угол зацепления α , град	20	20	20	20	20	
Модуль зацепления m , мм	6	4	8	5	10	
Диаметры основных окружностей	колеса d_k , мм	107,5	71,5	158,5	108,7	187,5
	шестерни $d_{ш}$, мм	107,5	143,1	574,2	498,5	837,5
Диаметры окружности выступов	колеса $d_{вк}$, мм	120	80	176	120	230
	шестерни $d_{вш}$, мм	120	152	592	520	860
Межцентровое расстояние a_{ω} , мм	108	108	288	310	525	
Твердость рабочей поверхности зуба $HB_{ш}$, HB_k	363	241	302	321	311	
Скорость вращения зубчатого колеса n_k , об/мин	300	350	400	500	600	
Относительное удлинение при разрыве, δ_k , $\delta_{ш}$ %	11	12	14	13	10	
Коэффициент контактно-фрикционной усталости, τ	1,5	1,3	1,6	1,2	1,4	

Таблица 8.13.2

Характеристика абразива	Вариант зубчатого зацепления				
	1	2	3	4	5
Концентрация абразива в смазке, %	1,0	1,3	1,5	1,2	1,8
Средний радиус абразивных частиц r , мм	0,03	0,02	0,04	0,05	0,06
Предел прочности на сжатие σ , кг/мм ²	25	30	35	40	45

Алгоритм расчета



Скорость изнашивания зубьев колеса $J_{гк}$ и шестерни $J_{гш}$ определяется по формулам:

$$J_{гк} = 4 \cdot 10^2 \frac{AK_к}{M_к} \quad \text{и} \quad J_{гш} = 4 \cdot 10^2 \frac{AK_ш}{M_ш}$$

где величина A , учитывающая влияние параметров абразива на скорость изнашивания, определяется из соотношения:

$$A = q^{0,7} r^{0,5} \sigma^{2,5}$$

Величины, учитывающие механические свойства материала, $M_к$ и $M_ш$ равны:

$$M_к = \delta_к^r HB_к^{1,5} HB_ш; \quad M_ш = \delta_ш^r HB_ш^{1,5} HB_к$$

Влияние кинематических параметров на скорость изнашивания учитывается величиной $K_к$ и $K_ш$ равной:

$$K_к = [2m(z_к + z_ш) \sin \alpha]^{0,5} K_{гк} n_к;$$

$$K_ш = [2m(z_к + z_ш) \sin \alpha]^{0,5} K_{гш} n_ш$$

Усредненный коэффициент, учитывающий влияние геометрических параметров зацепления на скорость изнашивания, определяется по формуле:

$$K_{гш} = \frac{K_{гк} \left(\frac{1}{i+1} - \chi_к \right) + K_{гш} \left(\chi_ш - \frac{1}{i+1} \right)}{3(\chi_ш - \chi_к)}$$

Величины $\chi_к$ и $\chi_ш$, определяющие точки начала и конца рабочего участка зацепления находят по формулам

$$\chi_к = 1 - \frac{(d_{вк}^2 - d_к^2)^{1/2}}{2a_w \sin \alpha} \quad \text{и} \quad \chi_ш = \frac{(d_{вш}^2 - d_ш^2)^{1/2}}{2a_w \sin \alpha}$$

Значение коэффициентов $K_{гк}$ и $K_{гш}$, учитывающих геометрические параметры зацепления на скорость изнашивания соответственно колеса и шестерни определяются по формулам:

$$K_{гк} = [\chi_к(1 - \chi_к)]^{1/2} \frac{\chi_к - (1 - \chi_к)i}{\chi_к}$$

$$K_{гш} = [\chi_ш(1 - \chi_ш)]^{1/2} \frac{\chi_ш - (1 - \chi_ш)i}{\chi_ш}$$

Упражнение 14

При подготовке к покраске деталь подвергается дробеструйной обработке. Рассчитать время $\tau_д$, необходимое для снятия слоя заданной толщины δ .

Исходные данные.

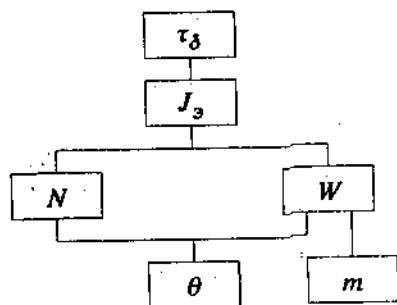
Материал дробы и детали — сталь Ст3, модуль упругости — $E = 2,1 \cdot 10^5$ Па, коэффициент Пуассона — $\mu = 0,3$, константа фрикционной усталости — $\sigma_0 = 0,5$ ГПа, плотность — $\rho = 7,9$ г/см³, коэффициент фрикционной усталости — $t_y = 2$, коэффициент трения дробы по поверхности детали — $f = 0,2$, диаметр дробы — $d = 1,6$ мм.

Режимы обработки представлены в табл. 8.14.

Таблица 8.14

Номер детали	Характеристика режимов обработки			
	Скорость потока дроби V, м/с	Угол между направлением потока дроби и поверхностью детали α, град	Плотность потока дроби Φ, кг/(м ² ·с)	Толщина снимаемого слоя δ, мм
1	60	30	2,0	0,27
2	65	35	2,1	0,25
3	68	40	2,3	0,21
4	60	45	2,4	0,30
5	65	40	2,8	0,34
6	65	35	3,0	0,28
7	70	45	2,1	0,25
8	80	60	2,7	0,40
9	90	30	2,4	0,24
10	100	45	3,5	0,33

Алгоритм решения



Время τ_δ, необходимое для снятия слоя металла толщиной δ с поверхности детали определяется по формуле:

$$\tau_{\delta} = \delta \rho (J_3 \Phi \sin \alpha)^{-1},$$

где J₃ — интенсивность эрозионного износа определяется из формулы:

$$J_3 = \frac{1,22 \rho_{дет} W}{\rho_{др} N}$$

Безразмерные энергетические W и усталостные комплексные N параметры определяются из следующих соотношений при условии упругого взаимодействия дроби с поверхностью детали:

$$W = \left(\frac{8mV^2 \Theta_{\Sigma} \sin^2 \alpha}{d^3} \right)^{\frac{(t_y + 5)}{5}},$$

$$N = \left(\frac{\pi [4f^2 (1 - \mu - \mu^2) + (1 - 2\mu)^2]^{1/2}}{\sigma_0 \Theta_{\Sigma}} \right)^{t_y}$$

где m — масса одной дроби; Θ_Σ — постоянная упругости материалов (порядок вычисления см. упр. 3).

Упражнение 15

Рассчитать ресурс подшипника скольжения, T с тонкослойным антифрикционным покрытием на поверхности втулки (прямая пара трения).

Исходные данные:

предельно допустимый зазор подшипника, [Δ] = 5,1 · 10⁻⁴ м;

начальный радиальный зазор, Δ₀ = 1 · 10⁻⁴ м;

нормальная нагрузка на подшипник N = 3,9 · 10³ Н.

Параметры подшипника и антифрикционного покрытия приведены в табл. 8.15.

Таблица 8.15

Параметры антифрикционного покрытия	Значения параметров для покрытий			
	ФКН7	Ф4К20	АФ1М	
Модуль упругости материала антифрикционного покрытия E, 10 ¹⁰ , Па	1,15	0,90	0,85	
Коэффициент Пуассона материала покрытия μ	0,4	0,4	0,4	
Радиус цапфы R, 10 ⁻² м	7	5	10	
Длина подшипника l, 10 ⁻² м	20	30	35	
Угловая скорость вращения цапфы ω, с ⁻¹	3,17	3,14	2,57	
Параметры степенного закона изнашивания	κ, 10 ⁻⁹	4,8	4,5	4,6
	m	1,5	2,0	1,0

Схема решения

При расчете подшипника скольжения с прямой парой трения принимаются следующие допущения:

- износ цапфы пренебрежительно мал по сравнению с износом покрытия на втулке и поэтому не учитывается;
- цапфа и обойма втулки считаются недеформируемыми телами, деформации локализованы в антифрикционном слое, которым облицована втулка подшипника;
- толщина покрытия втулки мала по сравнению с размерами соприкасающихся тел;
- износ в период приработки пренебрежительно мал по сравнению с нестационарным периодом изнашивания.

Исходя из принятых допущений, методика расчета подшипника учитывает эволюцию размеров рабочей поверхности антифрикционного покрытия, обусловленную степенным законом изнашивания.

Ресурс работы подшипника определяется интервалом времени, в конце которого радиальный зазор в сопряжении достигнет своего предельного значения $[\Delta]$:

$$T = \left(\frac{Rl}{N}\right)^m \frac{\Delta_0}{k\omega R} [F_1(m[\varphi]) - F_2(m\varphi_0)],$$

где $[\varphi]$ — предельный угол контакта в сопряжении, соответствующий предельно допустимому смещению оси вала относительно оси втулки:

$$[\varphi] = \arccos \frac{\Delta_0}{[\Delta]}$$

φ_0 принимаем равным 60° .

Значение вспомогательной функции F_1 и F_2 определим из эмпирических соотношений:

$$F_1 = m \exp(0,08[\varphi] - 4,8) \cdot \exp(0,08[\varphi] - 4,6),$$

$$F_2 = m \exp(0,08\varphi_0 - 4,8) \cdot \exp(0,08\varphi_0 - 4,6).$$

Упражнение 16

Рассчитать ресурс подшипников скольжения T с обратной парой трения.

Каждый подшипник работает без смазки и состоит из стального вала, на поверхность которого нанесено покрытие из полимерной композиции и втулки, выполненной из стали. Предельный допустимый зазор в сопряжении $[\Delta] = 3 \cdot 10^{-4}$ м. Покрытие выполнено толщиной $h = 2,2 \cdot 10^{-4}$ м. Нагрузка на подшипник составляет $N = 6 \cdot 10^3$ Н, коэффициент трения $f = 0,21$. Характеристика материала вала и втулки: $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,37$ Вт/м·К⁻¹; коэффициент линейного расширения $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,3 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹. Параметры закона изнашивания и теплофизических характеристик полимерных композиций приведены в табл. 8.16.

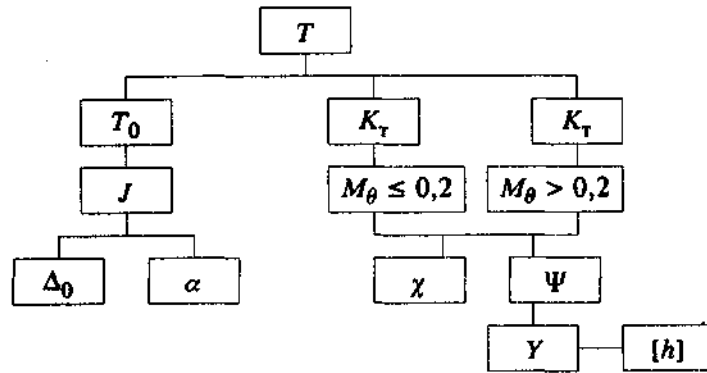
Таблица 8.16

Исходные параметры		Полимерная композиция		
		ФКН-7	Ф4К20	АФ1М
Радиус вала $R_2 \cdot 10^{-2}$ м		2	2,5	3,0
Длина подшипника $l \cdot 10^{-2}$ м		4,5	5,0	5,5
Начальный радиальный зазор $\Delta_0 \cdot 10^{-4}$ м		2,8	3,0	3,0
Угловая скорость ω , с ⁻¹		0,705	0,765	0,740
Теплофизические свойства	λ_3 , Вт/м·К ⁻¹	0,98	1,02	1,02
	$\alpha_3 \cdot 10^{-3}$ К ⁻¹	7,0	7,0	5,0
Механические свойства	E_3 , 10^{10} Па	1,15	0,90	0,85
	μ_3	0,40	0,40	0,40
Параметры степенного закона изнашивания	$k \cdot 10^{-19}$	4,8	4,5	4,6
	m	1,5	1,7	1,3

Алгоритм решения

Ресурс работы подшипника скольжения T определяется по формуле:

$$T = T_0 K_T,$$



где T_0 — ресурс работы подшипника, обусловленный параметрами фрикционного нагружения; K_T — коэффициент, учитывающий температурные деформации полимерного слоя.

T_0 определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{4\pi\Delta_0}{\alpha J \omega},$$

где размер площадки контакта, α определяется из формулы:

$$\alpha = \left(\frac{4(1 + \epsilon_0) N \Theta_\Sigma R}{\pi \epsilon_0 l} \right)^{1/2},$$

где относительный зазор, ϵ_0 определяется из соотношения $\epsilon_0 = \frac{\Delta_0}{R}$; а упругая постоянная материалов Θ_Σ определяется согласно с рекомендациями, приведенными в упражнении 3.

J определяется по формуле:

$$J = kq^m.$$

Давление q в центре площадки контакта определяется из формулы:

$$q = \left(\frac{\epsilon_0 N}{\pi(1 + \epsilon_0) \Theta_\Sigma l R} \right)^{1/2}.$$

Величина F_T определяется в зависимости от деформации сопрягаемых элементов подшипника скольжения, обусловленных фрикционным разогревом. Температурные деформации оцениваются критерием, M_θ :

$$M_\theta = m \chi \psi^{-1},$$

где χ — контактно-термический параметр, определяемый из формулы:

$$\chi = fN\omega R \frac{(1 + \mu_1) \alpha_1 + (1 + \mu_3) \alpha_3}{(\lambda_1 + \lambda_3) \Theta_\Sigma l q},$$

а коэффициент нестационарности изнашивания, ψ :

$$\psi = \left(\frac{1 + y}{1 - \epsilon_0 y} \right)^{1/2},$$

где безразмерный предельный износ, $y = \frac{[h]}{\Delta_0}$, предельный износ $[h]$ равен: $[h] = [\Delta] - \Delta_0$.

При $M_\theta \leq 0,2$ величина K_T определится из соотношения:

$$K_T = 0,2y + 0,15.$$

При $M_\theta > 0,2$ K_T определится из соотношения, учитывающего температурные деформации тел:

$$K_T = \chi y^{-2,6} m^{1,2}.$$

Упражнение 17

Рассчитать ресурс подшипника скольжения, T с учетом износа цапфы и втулки.

Исходные данные:

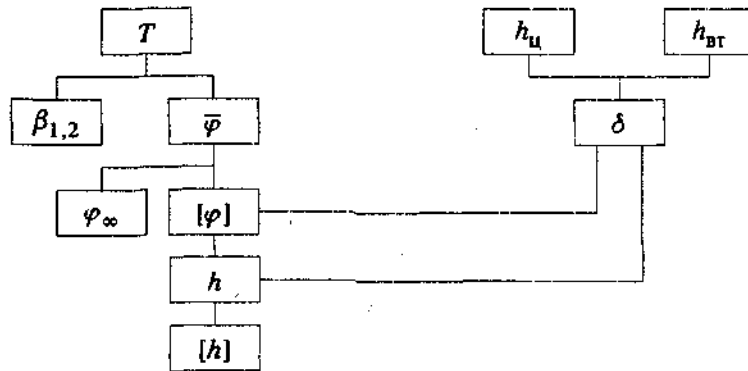
начальный радиальный зазор подшипника — $\Delta_0 = 4,5 \cdot 10^{-5}$ м;
предельно допустимый радиальный зазор — $[\Delta] = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м; нормальная нагрузка на подшипник — $N = 6 \cdot 10^3$ Н.

Остальные характеристики для каждого подшипника представлены в табл. 8.17.

Таблица 8.17

Характеристики и параметры	Номер подшипника		
	1	2	3
Радиус цапфы, $R, 10^{-2}$ м	3,00	2,50	3,50
Длина подшипника, $l, 10^{-2}$ м	4,50	5,00	5,50
Угловая скорость вращения цапфы, $\omega, \text{с}^{-1}$	1,60	1,45	1,81
Коэффициент износа втулки, $K_1 \cdot 10^{-16} \text{Па}^{-1}$	2,60	2,20	2,40
Коэффициент износа цапфы, $K_2 \cdot 10^{-15} \text{Па}^{-1}$	1,47	1,36	1,41

Алгоритм решения



Расчет ресурса подшипника скольжения в случае близких значений износостойкости материалов цапфы и втулки основывается на следующих предположениях: контактирующие тела считаются жесткими; интенсивность изнашивания каждого из сопрягаемых тел является линейной функцией давления.

В соответствии с принятыми допущениями в процессе работы подшипника начальный нулевой угол контакта по мере износа увеличивается, а контактное давление уменьшается. Ресурс подшипника определяется как время увеличения начального зазора Δ_0 до предельного значения $[\Delta]$, который складывается из износа цапфы и максимального износа втулки в середине дуги контакта.

Ресурс подшипника определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{2\beta_{12} + 1} \frac{l \Delta_0}{K_1 \omega N} \left(\frac{\bar{\varphi}}{\cos \bar{\varphi}} - \sin \bar{\varphi} \right),$$

где β_{12} — коэффициент относительной износостойкости, определяемый из соотношения:

$$\beta_{12} = \frac{K_2}{\pi K_1},$$

$\bar{\varphi}$ — условное значение предельного угла контакта определяется из соотношения:

$$\bar{\varphi} = [\varphi] \frac{\pi}{2\varphi_\infty}.$$

Предельный угол контакта $[\varphi]$ определяется из эмпирической формулы:

$$[\varphi] = 1,3 - \frac{h - 0,1}{10,8} - \frac{\beta_{12} - 0,2}{14}.$$

Относительный износ — $h = \frac{\Delta_0}{[h]}$, а предельный износ $[h] = [\Delta] - \Delta_0$, φ_∞ — предельный угол контакта при бесконечно большом времени изнашивания определяется из формулы:

$$\varphi_\infty = 1,5 - 0,5 \lg 10\beta_{12}.$$

Расчет износа цапфы производится по формуле:

$$h_u = \frac{[h]}{1 + \delta}.$$

Расчет износа втулки производится по формуле:

$$h_{vt} = \frac{\delta [h]}{1 + \delta}.$$

Отношение износа цапфы к износу втулки определяется по формуле:

$$\delta = \frac{h_u}{h_{vt}} = \frac{(h + 1) \cos [\varphi] - h}{1 - [(h + 1) \cos [\varphi] - h]}.$$

Упражнение 18

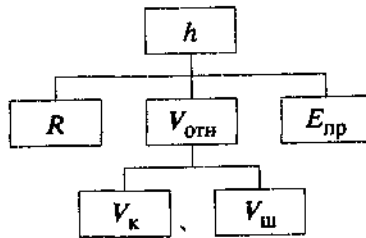
Для контакта в полюсе зацепления цилиндрических прямозубых передач рассчитать толщину масляной пленки h .

Исходные данные представлены в табл. 8.18. Материал шестерни и колеса назначить самостоятельно.

Таблица 8.18

Характеристики зубчатых передач		Вариант зубчатого зацепления						
		1	2	3	4	5	6	7
Радиусы начальных окружностей	$R_{ш}$, шестерни	40	55	80	75	65	100	60
	R_k , колеса	120	125	380	350	320	120	180
Угловая скорость шестерни ω , c^{-1}		115	100	125	200	250	175	210
Динамическая вязкость масла $\mu \cdot 10^4$ Па·с		7,6	4,0	0,5	0,2	1,6	0,7	0,6
Пьезокэффициент масла $a \cdot 10^8$ m^2/kg		20,7	19,2	15,0	12,3	8,3	9,1	9,5
Максимальное давление в контакте по Герцу P_r , 10^8 Па		1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,5	1,8

Алгоритм решения



Расчетные зависимости

Толщина масляной пленки h , разделяющей контактирующие поверхности зубьев определяется по формуле:

$$h = \frac{1,65 (\mu a V_{отн} / R_{пр})^{0,73} (P_r / E_{пр})^{-0,18}}{R_{пр}}$$

где $R_{пр}$ — приведенный радиус определится из формулы:

$$R_{пр} = \frac{R_k R_{ш}}{R_k + R_{ш}}$$

Приведенный модуль упругости $E_{пр}$ равен:

$$E_{пр} = E (1 - \mu_{п}^2)$$

где $\mu_{п}$ — коэффициент Пуассона.

Относительная линейная скорость $V_{отн}$ равна:

$$V_{отн} = \frac{V_k + V_{ш}}{2}$$

Упражнение 19

Рассчитать замкнутый радиальный гидростатически подшипник скольжения.

Исходные данные:

динамическая вязкость масла, $\mu = 0,05$ Па·с; толщина смазочного слоя $h = 25$ мкм, параметр настройки проводимости дросселя $K_d = 1$.

Режимы работы подшипника и геометрические размеры даны в табл. 8.19.

Таблица 8.19

Параметры подшипника	Номер подшипника									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нагрузка N , Н	20	22	24	25	21	26	27	28	29	19
Частота вращения n , об/мин	1000	750	1500	3000	750	1500	3000	1000	750	1500
Диаметр вала D , мм	100	120	125	100	130	120	140	135	125	120
Длина подшипника L , мм	110	100	115	120	120	125	115	110	110	100
Длина сливных перемычек l_1 , мм	12	12	15	20	18	16	10	18	21	18
Длина перемычек между канавками l_2 , мм	10	12	10	15	18	16	20	16	15	14

Расчетные зависимости

Расчет гидростатического подшипника основан на уравнении Рейнольдса и включает определение:

1. Гидростатической жесткости, $J_{гс}$ по формуле:

$$J_{гс} = 3,82 \frac{L - l_1}{D} \frac{K_d}{(1 + K_d) 1 + K_d + 4(L - l_1) l_1 / (\pi D l_2)} \frac{P D^2}{h},$$

где P — давление в подшипнике.

2. Расхода смазки, Q по формуле:

$$Q = P \frac{h \pi D}{6 \mu l_1} \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

3. Мощности затрачиваемой на прокачку масла $N_{пр}$ по формуле:

$$N_{пр} = P^2 \frac{h \pi D}{6 \mu l_1} \frac{K_d}{1 + K_d} \text{ [Вт]}.$$

4. Мощности, затрачиваемой на преодоление трения N_{τ} из выражения:

$$N_{\tau} = [4(L - 2l_1) l_2 + 2\pi D l_1] \left(\frac{\pi}{60} D \mu \right)^2 \frac{\mu}{h} \text{ [Вт]}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
2. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. — Мн.: Наука и техника, 1976. — 432 с.
3. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968, — 543 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
5. Зозуля В.Д., Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я. и др. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. 2-е изд. — Киев.: Техніка, 1990. — 264 с.
6. Икрамов У.А., Левитин М.А. Основы трибоники. — Ташкент: Укитувги, 1984. — 184 с.
7. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. — Киев.: Техніка, 1970. — 396 с.
8. Крагельский И.В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968. — 470 с.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др. / Под ред. А.В. Чичинадзе: Учебник для технических вузов. — М.: 1995, — 778 с.
10. Справочник по триботехнике. В 3-х томах. Под ред. М. Хеды и А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1992. — 730 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

11. Адамсон А. Физическая химия поверхности. — М.: Мир, 1979. — 588 с.
12. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. — Рига: Зинатне, 1979. — 224 с.
13. Авдеев Д.Т., Кутьков А.А., Курочка А.К. Коэффициенты трения покоя антифрикционных полимерных материалов. Ростов, 1981, — 96 с.
14. Аксенов А.Ф., Лозовский В.Н. Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов. — М.: Транспорт, 1986. — 240 с.
15. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. — М.: Машиностроение, 1977. — 181 с.
16. Алексеев Н.М. Металлические покрытия опор скольжения. — М.: Наука, 1973. — 74 с.
17. Альшиц И.Я. Опоры скольжения. — М. 1958.

18. Амосов А.П. Релаксационные колебания при внешнем трении. - М.: ДАИ, 1973.
19. Андрейкив А.Е., Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. —Киев.: Наук. думка, 1991. —154 с.
20. Антифрикционные эпоксидные композиты в станкостроении./ П.В. Сысоев, М.М.Близнац, А.К. Погосян и др. —Мн.: Наука и техника, 1990. —231 с.
21. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. —М.: Наука, 1978. —219 с.
22. Балакин В.А. Основы поверхностного слоя. /Трение и износ/. -Гомель.: Гомельский ун-т, 1974. —242 с.
23. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. —М.: Химия, 1972. —240 с.
24. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель М.Я. Подшипники качения. —М.: Машиностроение, 1975. —574 с.
25. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. —М.: Машиностроение, 1991. —208 с.
26. Белый В.А., Врублевская В.И., Купчинов Б.И. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. —Мн.: Наука и техника, 1980. —276 с.
27. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем. —Киев.: О-во Знание; РДЭНТП, 1981. —36 с.
28. Бершадский Л.И. Переходные процессы трения и надежность машин. —Киев. 1980.
29. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев. 1990. —30 с.
30. Билик Ш.М. Пары трения металл-пластмасса в машинах и механизмах. —М.: Машиностроение, 1966. —311 с.
31. Билик Ш.М. Макрогеометрия деталей машин. —М.: Машиностроение, 1973. —344 с.
32. Борисов М.И., Павлов И.А., Постников В.И. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества. —М.: Стандарт, 1976. —352 с.
33. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.Н., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. —М.: Машиностроение, 1982. —190 с.
34. Брэйтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. —М.: Химия, 1967. —320 с.
35. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. —М.: Наука, 1981. —126 с.

36. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. —М.: Транспорт, 1987. —223 с.
37. Вадас Э. Изготовление и ремонт деталей машин с полимерным покрытием/Пер. с венг./Под ред. А.Л. Левина. - М.: Машиностроение, 1986. —354 с.
38. Вальдма Л.Э. Расчет абразивного износа металлов по диаграммам трения. —Таллин.: Валгус, 1965, сер. 1, с. 43—48
39. Величкин И.И., Нисневич А.И., Зублетова М.П. Ускоренные испытания дизельных двигателей на износостойкость. —М.: Машиностроение, 1964. —183 с.
40. Венцель С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания. —Киев.: Техніка, 1977. —105 с.
41. Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. —М.: Химия, 1979. —240 с.
42. Вежхольский К. Смазка подшипников скольжения (теория и практика). - М.: МФК, 1994. —232 с.
43. Виленкин А.В. Масло для шестеренных передач. —М.: Химия, 1982. —284 с.
44. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. —М.: Машиностроение, 1990. —221 с.
45. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Шрейбер Г.К. Ударно-абразивный износ буровых долот. —М.: Недра, 1975. —167 с.
46. Виноградова И.Э. Противоизносные присадки к маслам. —М.: Химия, 1972. —272 с.
47. Виноградов Ю.М. Трение и износ модифицированных металлов. —М.: Наука, 1972. —141 с.
48. Вольф Э.Л., Куприянов Н.А., Кашеев В.Н. Введение в трибонику и трибологические отказы. Учебное пособие. Томск, 1991. —103 с.
49. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. —Л.: Машиностроение, 1979. —224 с.
50. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). —М.: Машиностроение, 1980. —224 с.
51. Галахов М.А., Бурмистров А.Н. Расчет подшипниковых узлов. —М.: Машиностроение, 1988. —272 с.
52. Галахов М.А., Усов П.П. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения. —М.: Наука, 1990. —277 с.
53. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. —М.: Транспорт, 1969. —104 с.

54. Гаркунов Д.Н. Триботехника. —М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
55. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. —М.: Машиностроение, 1974. —200 с.
56. Геккер Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в улах трения. —М.: Машиностроение, 1983. —168 с.
57. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. —Киев.: Техніка, 1974. —270 с.
58. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. —Киев.: Техніка, 1965. —231 с.
59. Гольдаде В.А., Струк В.А., Песецкий С.С. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. —М.: Химия, 1993. —240 с.
60. Гороховский Г.А. Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металлов. —Киев.: Наукова думка, 1972. —152 с.
61. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. —М.: Машиностроение, 1988. —253 с.
62. Гриб В.В. Решение триботехнических задач численными методами. —М.: Наука, 1982. —112 с.
63. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. —М.: Наука, 1968. —141 с.
64. Григорьев М.А., Бунаков Б.М., Долецкий В.А. Качество моторного масла и надежность двигателей. —М.: Стандарт, 1981. —231 с.
65. Григорьев М.А., Пономарев Н.Н. Износ и долговечность автомобильных двигателей. —М.: Машиностроение, 1976. —245 с.
66. Гришин Н.Н., Ширяев С.Б., Прокопьев И.А. и др. Химмотология пластичных смазок. Учебное пособие. —М.: ГАНГ им. Губкина, 1994. —147 с.
67. Грозин Б.Д. Износ металлов. —Киев.: Гостехиздат, 1951. —422 с.
68. Гуреев А.А., Фукс И.Г., Лашхи В.Л. Химмотология. - М.: Химия, 1986. —368 с.
69. Демкин Н.Б. Фактическая площадь контакта твердых поверхностей. —М.: Изд-во АН СССР, 1962. —112 с.
70. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. —М.: Наука, 1970. —227 с.
71. Демкин Н.Б., Рыжков Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. —М.: Машиностроение, 1981. —244 с.
72. Дерягин Б.В. Что такое трение? —Изд-во АН СССР, 1963. —160 с.
73. Джержи К.В. Моторные масла и смазка двигателей. —М.: 1959.
74. Джонсон Д. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. —510 с.
75. Доценко В.А. Изнашивание твердых тел. М. 1990. —192 с.
76. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. —М.: Машиностроение, 1986. —210 с.
77. Дроздов Ю.Н., Арчегов В.Г., Смирнов В.И. Противозадирная стойкость трущихся тел. —М.: Наука, 1981. —139 с.
78. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин. —Москва-Киев.: Машгиз, 1963. —138 с.
79. Душин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. —М.: Машиностроение, 1978. —232 с.
80. Дьяченко П.Е. и др. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей. М. 1963.
81. Дьячков А.К. Подшипники скольжения жидкостного трения. М. 1955. —152 с.
82. Евдокимов В.Д., Семов Ю.И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. —М.: Наука, 1973. —180 с.
83. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. —М.: Наука, 1980. —230 с.
84. Жилин В.А. Субатомный механизм износа режущего инструмента. —Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1973. —165 с.
85. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. —М.-Л.: Машгиз, 1947. —256 с.
86. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. —М.: Химия, 1991. —239 с.
87. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Механизм действия провозносных присадок к маслам. —М.: Химия, 1978. —224 с.
88. Ивкович Б. Трибология резания. Смазочно-охлаждающие жидкости. —Мн.: Наука и техника, 1982. —142 с.
89. Износостойкие композиты на основе реактопластов. / П.В. Сысоев, М.М.Близнец, А.Л. Зайцев и др. —Мн.: Наука и техника, 1987. —191 с.
90. Икрамов И.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. —М.: Машиностроение, 1987. —228 с.
91. Исаченков Е.Н. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением. —М.: Машиностроение, 1978. —208 с.
92. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле. —М.: Машгиз, 1962. —196 с.
93. Канарчук В.Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы. Киев, 1978. —225 с.
94. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. —М.: Наука, 1978. —136 с.

95. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира. М. 1993, —328 с.
96. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. —М.: Машиностроение, 1978. —213 с.
97. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. —М.: Наука, 1970. —248 с.
98. Кершенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М. 1987, —230 с.
99. Кислик В.А. Износ деталей паровозов. М. 1948, —330 с.
100. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты. —М.: Химия, 1988. —486 с.
101. Климович А.Ф., Свириденко А.И. Электрические явления при трении полимеров. —Мн.: Наука и техника, 1994. —268 с.
102. Клейс И.Р., Уумыс Х.Г. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. —М.: Машиностроение, 1986. —157 с.
103. Кнаушер Л. Повышение качества поверхности и планирование металлов. —М.: Металлургия, 1984. —368 с.
104. Ковалев М.П., Сивоконенко И.М., Явленский К.Н. Опоры приборов. —М.: Машиностроение, 1967. —192 с.
105. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. —М.: Машиностроение, 1976. —303 с.
106. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Н.К. Эластогидродинамический расчет деталей машин. —М.: Машиностроение, 1988. —162 с.
107. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. —М.: Машиностроение, 1984. —139 с.
108. Комбалов В.С. Влияние шероховатости тел на трение и износ. —М.: Наука, 1974. —112 с.
109. Комбалов В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. —М.: Наука, 1983. —136 с.
110. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. —Мн.: Наука и техника, 1986. —255 с.
111. Кордонский Х.Б., Харач Г.М., Артамоновский В.П., Непомнящий Е.Ф. Вероятностный анализ процесса изнашивания. М. 1968, 56 с.
112. Коробов Ю.М., Прейс Г.А. Электромеханический износ при трении и резании металлов. Киев, 1976, —200 с.
113. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. —М.: Машгиз, 1959. —403 с.
114. Костерин Ю.Н. Механические автоколебания при сухом трении. М. 1960, —212 с.
115. Костецкий Б.И., Натансон М.З., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. —М.: Наука, 1972. —170 с.
116. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. —Киев.: Техніка, 1976. —296 с.
117. Костецкий Б.И., Колениченко Н.В. Качество поверхности и трение в машинах. —Киев.: Техніка, 1969. —215 с.
118. Коршак В.В. Теплостойкие полимеры. —М.: Химия, 1969. —152 с.
119. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. —М.: Машиностроение, 1977. —526 с.
120. Крагельский И.В. Подбор фрикционных пар. М. 1955.
121. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. —М.: Изд-во АН СССР, 1956. —234 с.
122. Крагельский И.В., Виноградов Н.М. Коэффициенты трения. —М.: Гос. научн. технич. изд-во машиностр. лит., 1962. —220 с.
123. Крагельский И.В., Комбалов В.С., Логинов А.Р., Сачек Б.Я. Современные методы прогнозирования узлов трения. —М. 1979.
124. Крагельский И.В., Ямпольский Г.Я. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. —М.: Наука, 1973. —163 с.
125. Крагельский И.В., Михин И.М. Узлы трения машин. —М.: Машиностроение, 1984. —280 с.
126. Криштал М.А., Головин И.С. Внутренне трение и структура металлов. —М.: Металлургия, 1976. —376 с.
127. Крыжановский В.К. Износостойкие реактопласты. —Л.: Химия, 1984. —121 с.
128. Кудиш И.И. Расчет износа и усталостного выкрашивания в подшипниках качения: Обзор. —М.: ВНИИ, 1989. —64 с.
129. Кудинов В.А. Природа автоколебаний при трении. —М.: Машгиз, 1958. —215 с.
130. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении. —М. 1956.
131. Кузнецов В.Д. Физика резания, трение металлов и кристаллов. —М. 1977, —310 с.
132. Купчинов Б.И., Родненков В.Г., Ермаков С.Ф. Введение в трибологию жидких кристаллов. —Гомель, 1993, —156 с.
133. Кутьков А.А. Исследования в области трения и износа металлополимерных пар. Кишинева, 1969.
134. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. —М.: Машиностроение, 1976. —152 с.
135. Лазарев Г.Е. Методика испытания фрикционных материалов на трение и износ. —М. 1963.

136. Лазаренко В.К., Прейс Г.А. Износостойкость металлов. —М.: 1960.
137. Лapidус А.С. Данные по износу и методы повышения износостойчивости направляющих металлорежущих станков. —М.: Машиностроение, 1950 —30 с.
138. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. —М.: Наука, 1979. —184 с.
139. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и ее измерение. —М.: Стандарт, 1973. —184 с.
140. Лоренц В.Ф. Износ деталей сельскохозяйственных машин. М. 1965, —55 с.
141. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. —М.: Металлургия, 1976. —176 с.
142. Любарский И.М. Повышение износостойкости тяжело нагруженных шестерен. —М.: Машиностроение, 1965. —132 с.
143. Макушок Е.М. Механика трения. —Минск.: Наука и техника, 1974. —254 с.
144. Макушок Е.М., Калиновская Т.В., Белый А.В. Массоперенос в процессах трения. —Мн.: Наука и техника, 1978. —271 с.
145. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. —М.: Наука, 1979. —118 с.
146. Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. —М.: Наука, 1971. —226 с.
147. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лозовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. —М.: Наука, 1978. —191 с.
148. Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др. Смазочные материалы. —М.: Машиностроение, 1989. —224 с.
149. Микутенок Е.А., Шкаренко В.А., Резников В.Д. Смазочные системы дизелей. —Л.: Машиностроение, 1986. —125 с.
150. Митрович В.П. Исследование трения полиамидов по стали. —М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. —96 с.
160. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. —М.: Наука, 1977. —219 с.
161. Михин Н.М. Трение в условиях пластического контакта. —М.: Наука, 1968. —104 с.
162. Мишкаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. Киев 1982.
163. Мошков А.Д. Пористые антифрикционные материалы. —М.: Машиностроение, 1968. —208 с.
164. Мур Д. Основы и применение трибоники. —М.: Мир, 1978. —487 с.
165. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на износ металлов. —Киев.: Техніка, 1968. —180 с.
166. Орлов А.В., Пинегин С.В. Исследование пластмасс как материалов для опор качения. —М.: Наука, 1972. —92 с.
167. Орлов А.В. Опоры качения с поверхностями сложной формы. —М.: Наука, 1983. —125 с.
168. Папок К.К. Химмотология топлив и смазочных масел. —М.: Воениздат, 1981. —134 с.
169. Петров Н.П. Гидродинамическая теория смазки. М. 1948, —550 с.
170. Пинегин С.В., Орлов А.В., Табачников Ю.Б. Прецизионные опоры качения с газовой смазкой. —М.: Машиностроение, 1984. —243 с.
171. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. —М.: Машиностроение, 1976. —243 с.
172. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. —М.: Машиностроение, 1977. —139с.
173. Погодаев Л.В., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. - М.: Судостроение, 1984. —264 с.
174. Подшипники качения /Под редакцией В.Н. Нарышкина и Р.В. Коросташевского. —М.: Машиностроение, 1984. —280 с.
175. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник/ Под ред. А.В.Чичинадзе. —М.: Машиностроение, 1988. —328 с.
176. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. —М.: Машиностроение, 1984. —264 с.
177. Поляков А.А., Рузанов Ф.И. Трение на основе самоорганизации./ Под ред. А.В.Чичинадзе. —М.: Наука, 1992. —153 с.
178. Постников В.С. Внутренне трение в металлах. —М.: Металлургия, 1974. —352 с.
179. Постников В.И. Радиоктивные изотопы в исследовании и автоматизации контроля износа. —М.: Машиностроение, 1967. —107 с.
180. Прокопенко А.К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. —М.: Легпромбытиздат, 1987. —103 с.
181. Проников А.С. Надежность машин. —М.: Машиностроение, 1978. —592 с.
182. Пружанский Л.Ю. Исследование методов испытаний на изнашивание. —М.: Наука, 1978. —116 с.
183. Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. —Л.: Машиностроение, 1989. —229 с.
184. Райко М.В. Смазка зубчатых передач. —Киев.: Техніка, 1958. —194 с.

185. Расчетно-экспериментальные методы оценки трения и износа./ Крагельский И.В. и др. М. 1980.
186. Расчет, испытания и подбор фрикционных пар/А.В. Чичинадзе, А.Г. Гинзбург, З.В. Игнатъева. —М.: Наука, 1979. —268 с.
187. Ребиндер Н.А. Физико-механическая механика. —М.: Наука, 1979. —381 с.
188. Решиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач. —М.: Машиностроение, 1975. —232 с.
189. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. —М.: Машиностроение, 1970. —313 с.
190. Рубин М.В., Бахарева В.Е. Подшипники в судовой технике. —Л.: Судостроение, 1987. —344 с.
191. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. —Рига.: Зинатне, 1975. —210 с.
192. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. —М.: Машиностроение, 1982. —209 с.
193. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. - Киев.: Наукова думка, 1988. —172 с.
194. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. —Минск.: Наука и техника, 1990. —272 с.
195. Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Калмыкова Т.Ф. Холодилов О.В. Акустические и электрические методы в триботехнике. —Минск.: Наука и техника, 1987. —280 с.
196. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. металлофторопластовые подшипники. —М.: Машиностроение, 1976. —192 с.
197. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких металлов при высоких температурах. —М.: Машиностроение, 1972. —160 с.
198. Силин А.А. Трение и мы. —М.: Наука, 1987. —189 с.
199. Силин А.А. Трение и его роль в развитии техники. —М.: Наука, 1983. —178 с.
200. Синицин В.В. Подбор и применение пластичных смазок. —М.: Химия, 1974. —416 с.
201. Синицин В.В., Гришин Н.П. Пластичные смазки за рубежом. М. 1983.
202. Синицин В.В. Пластичные смазки в СССР. —М.: Химия, 1984. —192 с.
203. Сиренко Г.А., Свидерский В.П., Антифрикционные термостойкие полимеры. —Киев.: Техніка, 1978. —128 с.
204. Скорынин Ю.В. Надежность и долговечность опор подвижных систем приборов. —Минск.: Наука и техника, 1965. —110 с.
205. Скорынин Ю.В. Надежность трибомеханических систем. —Мн.: Наука и техника, 1994
206. Скорынин Ю.В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость. —Минск.: Наука и техника, 1972. —159 с.
207. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. —М.: Машиностроение, 1988. —246 с.
208. Счастливенко Ф.Е., Новожилов О.Ю., Скорынин Ю.В. и др. Технико-экономическая оценка методов определения износа деталей машин и оборудования. Минск, 1971.
209. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. —М.: Машиностроение, 1976. —271 с.
210. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. —М.: Машиностроение, 1966. —331 с.
211. Тидей Н. и др. Подшипники скольжения. Расчет, проектирование, смазка. Бухарест, 1964. —457 с.
212. Токарь И.Я. Проектирование и расчет опор трения. —М. 1971, —168 с.
213. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ. изд. / Под ред. Школьникова В.М. —М. 1989. —432 с.
214. Точильников Д.Г. Радиоиндикаторные методы определения износа двигателей внутреннего сгорания. Л. 1968, —158 с.
215. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн. / Под ред. Крагельского И.В. и Алисина В.В. —М. Кн. 1. 1978. —400 с., Кн. 2. 1979. —358 с.
216. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. / Под ред. Белого В.А., Лудемы К., Мышкина Н.К. —М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон Пресс, 1993. —454 с..
217. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс /Под ред. Сагалаева Г.В., Шембель Н.Л. —М. 1982. —64 с.
218. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. —Новосибирск, 1986. —200с.
219. Тылкин М.А. Прочность и износостойкость деталей металлургического оборудования. —М. 1965. —347 с.

220. Усков М.К., Максимов В.А. Гидродинамическая теория смазки. —М. 1985. —143 с.
221. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. —Киев, 1980. —403 с.
222. Филимонов Г.Н., Балацкий Л.Т. Фреттинг в соединениях судовых деталей. —Л. 1973. с. 296
223. Фрикционные композиты на основе полимеров./ А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян и др. —Мн. 1992, —218 с.
224. Фукс И.Г. Добавки к пластичным смазкам. —М. 1982, —248 с.
225. Фукс И.Г., Шибраев С.Б. Состав, свойства и применение пластичных смазок. —М.: ГАНГ им. Губкина, 1992. —157 с.
226. Ханин М.В., Зайцев Г.П. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. —М.: Химия, 1990. —256 с.
227. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов. М. 1984. —152 с.
228. Хайника Г. Трибохимия./ Пер. с англ. —М. 1987. —584 с.
229. Хольм Р. Электрические контакты. —М.: Изд. иностр. лит., 1961. —464 с.
230. Хрущев М.М. Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. —М.: Наука, 1970. —252 с.
231. Хрущев М.М. Закономерности абразивного изнашивания. Износостойкость. —М.: Наука, 1975. —5—28 с.
232. Хрущев М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. —М.,Л.: Изд-во АН СССР, 1946. —160 с.
233. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. —М.: Изд-во АН СССР, 1960. —351 с.
234. Хрущев М.М., Беркович Е.С. Точное определение износа деталей машин. —М. 1953. —116 с.
235. Цукерман С.А. Порошковые и композиционные материалы. —М.: 1976. —127 с.
236. Чередниченко Г.И., Фройштетер Г.Б., Ступак М.П. Физико-химические свойства смазочных материалов. —М.: Химия, 1986. —215 с.
237. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. М. 1963, 242 с.
238. Чертавских А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. —М. 1968. —362 с.
239. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. —М.: Мир, 1982. —180 с.
240. Чичинадзе А.В. Расчет и испытание фрикционных пар. —М.: 1974. —152 с.
241. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. —М.: Наука, 1967. —232 с.
242. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинзбург А.Г., Игнатъев З.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. —М.: Наука, 1979. —268 с.
243. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. —М.: Наука, 1986. —248 с.
244. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. —М.: Наука, 1967. —232 с.
245. Чичинадзе А.В., Левин А.Л., Бородулин М.М. и др. Полимеры в узлах трения машин и приборов. —М.: Машиностроение, 1988. —328 с.
246. Шестаков В.М. Работоспособность тонкослойных полимерных покрытий. —М. 1973, —160 с.
247. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. —Л.: Машиностроение, 1982. —246 с.
248. Шпагин А.И. Антифрикционные сплавы. —М. 1956. —320 с.
249. Шпеньков Г.П. Физико-химия трения применительно к избирательному переносу и водородному износу. —Минск, 1978. —204 с.
250. Шпеньков Г.Н. Физикохимия трения. —Мн.: Университетское, 1991
251. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. —Л. 1990. —208 с.
252. Ющенко С.А., Бараболя А.В. и др. Триботехнология формирования поверхностей. —Киев.: Наукова думка, 1989. —312 с.
253. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко И.С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование. —Киев: Техника, 1971. —148 с.
254. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. —Мн.: Наука и техника, 1984. —288 с.

СТАНДАРТЫ СТРАН СНГ В ОБЛАСТИ ТРИБОЛОГИИ

1. ГОСТ 23.001—77 Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения.
2. ГОСТ 23.002—78 Обеспечение износостойкости изделий. Трение изнашивание и смазка. Термины и определения.
3. ГОСТ 23.201—78 Метод испытаний материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя.
4. ГОСТ 23.202—78 Метод определения коэффициента трения при ударе.
5. ГОСТ 23.203—78 Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении.
6. ГОСТ 23.204—78 Метод оценки истирающей способности поверхности трения.
7. ГОСТ 23.205—79 Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима.
8. ГОСТ 23.207—79 Метод испытания машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание.
9. ГОСТ 23.208—79 Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы.
10. ГОСТ 23.210—80 Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов.
11. ГОСТ 23.211—80 Метод испытания материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг—коррозии.
12. ГОСТ 23.212—82 Метод испытания материалов на изнашивание при ударе в условиях низких температур.
13. ГОСТ 23.213—83 Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов.
14. ГОСТ 23.215—84 Экспериментальная оценка прирабатываемости материалов.
15. ГОСТ 23.216—84 Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании масло-хладоновыми смесями.
16. ГОСТ 23.219—84 Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при виброэрозионном изнашивании.
17. ГОСТ 23.220—84 Метод оценки истирающей способности поверхностей восстановленных валов.
18. ГОСТ 23.221—84 Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении.
19. ГОСТ 23.222—84 Метод оценки фрикционной совместимости наплавочных материалов для восстановления деталей.
20. ГОСТ 23.223—85 Метод определения триботехнических свойств конструкционных материалов при взаимодействии с волокнистой массой.
21. ГОСТ 23.224—86 Метод оценки износостойкости восстановленных деталей.
22. ГОСТ 26.614—85 Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических свойств.
23. ГОСТ 426—77 Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении.
24. ГОСТ 8975—75 Кожа искусственная. Метод определения истираемости и слипания покрытия.
25. ГОСТ 9188—75 Картон обувной. Метод определения истираемости во влажном состоянии.
26. ГОСТ 9210—77 Шкурки меховые и овчина шубная выделанные крашенные. Метод определения устойчивости окраски к трению.
27. ГОСТ 9490—75 Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине.
28. ГОСТ 9778—78 Материал переплетный на бумаге с пленочным покрытием. Метод определения устойчивости к истиранию.
29. ГОСТ 10642—63 Кожа для низа обуви. Метод испытания подошвенной кожи на сопротивление истиранию в воздушно-сухом состоянии.
30. ГОСТ 11279.8—83 Красители органические. Метод определения устойчивости окраски поливинилхлоридной пленки к сухому и мокрому трению.
31. ГОСТ 11613—65 Смазки твердые. Метод определения истираемости и антифрикционных свойств твердых смазочных покрытий.
32. ГОСТ 11629—75 Пластмассы. Метод определения коэффициента трения.
33. ГОСТ 12739—89 Полотна и изделия трикотажные. Метод определения устойчивости к истиранию.
34. ГОСТ 13869—74 Кожа хромовая для верха обуви. Метод определения устойчивости покрытия к мокрому трению.
35. ГОСТ 14090—68 Шкурки меховые. Метод определения устойчивости волосяного покрова к истиранию.
36. ГОСТ 14340.10—69 Провода эмалированные круглые. Методы испытания механической прочности изоляции на истирание.
37. ГОСТ 15967—70 Ткани льняные и полульняные для спецодежды. Метод определения стойкости к истиранию по плоскости.

38. ГОСТ 16218.8—89 Изделия текстильно-галантерейные. Метод определения устойчивости к истиранию.
39. ГОСТ 16483.39—81 Древесина. Метод определения показателя истирания.
40. ГОСТ 16733—71 Ткани текстильные. Метод определения стойкости к истиранию на сгибах.
41. ГОСТ 19865—74 Смазки пластичные. Ускоренный метод определения работоспособности в подшипниках качения.
42. ГОСТ 21466—76 Смазки пластичные. Метод определения времени работоспособности на пятишариковой машине трения.
43. ГОСТ 21523.10—88 Древесина модифицированная. Метод определения истирания.
44. ГОСТ 23509—79 Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении по возобновляемой поверхности.
45. ГОСТ 25691—83 Кожа искусственная и синтетическая для одежды. Метод определения динамического и статического коэффициента трения.
46. ГОСТ 27492—87 Материалы электроизоляционные полимерные, пленочные и листовые. Метод определения коэффициентов трения.
47. ГОСТ 27640—88 Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.
48. ГОСТ 27820—88 Метод определения стойкости защитно-декоративных покрытий к истиранию.
49. ГОСТ 28169—89 Шины пневматические. Метод определения износостойкости шин при дорожных испытаниях.
50. ГОСТ 28936—91 Кожа искусственная. Метод определения устойчивости к истиранию.
51. ГОСТ 28968—91 Рукава резиновые. Определение износостойкости наружной поверхности.
52. ГОСТ 29104.17—91 Ткани технические. Метод определения стойкости к истиранию на плоскости.
53. МР 74—82 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров.
54. МР 101—83 Классификатор триботехнических свойств материалов.
55. ГОСТ 23.209—79 Измерение износа деталей машин методом поверхностной активации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Факторы и поверхностные явления твердых тел, оказывающие влияние на трибологические процессы	7
1.1. Структура вещества	7
1.2. Несовершенство реальных кристаллов	11
1.3. Пластическая деформация кристаллических тел	16
1.4. Адгезия твердых тел	18
1.5. Адсорбция	21
1.6. Оксиды на металлах	23
Глава 2. Макро- и микрогеометрия поверхностей твердых тел ...	25
2.1. Макроотклонения поверхностей деталей	26
2.2. Волнистость поверхности	29
2.3. Шероховатость поверхности	30
2.4. Субшероховатость	44
Глава 3. Виды и характеристики трения	47
3.1. Внутреннее и внешнее трение	47
3.2. Трение покоя и трение движения	48
3.3. Трение скольжения. Верчение	50
3.4. Трение качения и трение качения с проскальзыванием	52
3.5. Трение при смазке	54
Глава 4. Виды и характеристики изнашивания	60
4.1. Абразивное изнашивание	61
4.2. Эрозионное изнашивание	64
4.3. Адгезионное изнашивание	67
4.4. Усталостное изнашивание	69
4.5. Коррозионно-механическое изнашивание	71
4.6. Фреттинг	73
Глава 5. Триботехническое материаловедение	75
5.1. Металлы и сплавы	75
5.2. Композиционные материалы	80
5.3. Смазочные материалы	86
Глава 6. Трибология и трибоинформатика	93
6.1. Методы оценки триботехнических свойств материалов и узлов трения	93
6.2. Машины для испытания на трение и износ	95
6.3. Методы и средства организации информации в области трибологии	99

Лабораторный практикум	103
Лабораторная работа № 1. Определение параметров шероховатости поверхности деталей щуповым методом	103
Лабораторная работа № 2. Определение среднего арифметического отклонения профиля R_a на профилометре модели 296	110
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента трения скольжения в поступательной паре	114
Лабораторная работа № 4. Определение трения скольжения в резьбе болтового соединения и на опорном торце гайки	118
Лабораторная работа № 5. Оценка триботехнических свойств материалов на основе полимеров	125
Лабораторная работа № 6. Определение фрикционной теплостойкости триботехнических материалов	135
Лабораторная работа № 7. Исследование абразивной стойкости материалов	142
Лабораторная работа № 8. Определение пенетрации пластичных смазок	149
Лабораторная работа № 9. Оценка реологических свойств смазочных материалов	155
Лабораторная работа № 10. Оценка работоспособности моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем	160
Лабораторная работа № 11. Оценка триботехнических свойств смазочных материалов	171
Упражнения	179
Литература	207
Приложение 1. Стандарты стран СНГ в области трибологии	220



"БЕЛИНВЕСТБАНК"



"БЕЛИНВЕСТБАНК"

был учрежден конференцией акционеров 23 сентября 1993 года как акционерное общество открытого типа. Зарегистрирован в

национальном банке Республики Беларусь 5 ноября 1993 года за номером N 32. Учредителями выступили Национальный банк Республики Беларусь, Мингосимущество Республики Беларусь и крупнейшие АКБ республики - "Белпромстройбанк", "Белбизнесбанк", "Белагропромбанк" и др.

Управляющим Гомельским филиалом АО "Белинвестбанк" является Н.В. Бонцевич.

"БЕЛИНВЕСТБАНК" ОКАЗЫВАЕТ УСЛУГИ:

- прием и размещение вкладов;
- предоставление и получение кредитов;
- учет векселя, чеков и других денежных обязательств;
- выдача гарантий и поручительств;
- производство операций с ценными бумагами, за исключением

операций эмитентов, которые обслуживаются в Белинвестбанке и филиале;

- приобретение и уступка денежных требований (включая факторинговые операции);

- оказание посреднических и консультационных услуг, связанных с банковской деятельностью;

- финансирование капитальных вложений по поручению владельцев или распорядителей инвестируемых средств;

- осуществление сделки на комиссионной основе; - прием на хранение ценностей;

- управление активами по доверенности;

- осуществление лизинговых операций;

- осуществление расчетов и переводов по поручению клиентов.

Филиал предоставляет весь комплекс кредитно-расчетных и других банковских услуг для отечественных и иностранных юридических и физических лиц, предусмотренный Уставом Белинвестбанка, обеспечивая соблюдение действующего на территории Республики Беларусь законодательства.

Филиал совершает с разрешения Белинвестбанка в установленном порядке операции с иностранной валютой в пределах лицензии, выданной Белинвестбанку Национальным банком и при наличии соответствующих технических и квалификационных условий.

Все отделы и службы банка работают с клиентами с 9-00 до 15-00 (выходные - суббота, воскресенье)



БЕЛИНВЕСТБАНК АО

филиал в г. Гомеле

Учредители: Национальный Банк Республики Беларусь, Мингосимущество Республики Беларусь и ряд ведущих банков.

ОКАЗЫВАЕТ УСЛУГИ:

- ✓ прием и размещение вкладов;
- ✓ предоставление и получение кредитов;
- ✓ учет векселя, чеков и других денежных обязательств;
- ✓ выдача гарантий и поручительств;
- ✓ производство операций с ценными бумагами, за исключением операций эмитентов, которые обслуживаются в Белинвестбанке и филиале;
- ✓ приобретение и уступка денежных требований (включая факторинговые операции);
- ✓ оказание посреднических и консультационных услуг, связанных с банковской деятельностью;
- ✓ финансирование капитальных вложений по поручению владельцев или распорядителей инвестируемых средств;
- ✓ осуществление сделки на комиссионной основе;
- ✓ прием на хранение ценностей; - управление активами по доверенности;
- ✓ осуществление лизинговых операций;
- ✓ осуществление расчетов и переводов по поручению клиентов.

Филиал предоставляет весь комплекс кредитно-расчетных и других банковских услуг для отечественных и иностранных юридических и физических лиц, предусмотренный Уставом Белинвестбанка, обеспечивая соблюдение действующего на территории Республики Беларусь законодательства.

Филиал совершает с разрешения Белинвестбанка в установленном порядке операции с иностранной валютой в пределах лицензии, выданной Белинвестбанку Национальным банком и при наличии соответствующих технических и квалификационных условий.

Все отделы и службы банка работают с клиентами с 9-00 до 15-00 (выходные - суббота, воскресенье)

246028, г. Гомель, ул. Советская, 126 Телефоны для справок: 56-07-20, 56-01-20, 56-96-90, 56-47-54 Телефакс: 56-96-72, 56-96-92, 56-41-88

246028, г. Гомель, ул. Советская, 126 Телефоны для справок: 56-07-20, 56-01-20, 56-96-90, 56-47-54 Телефакс: 56-96-72, 56-96-92, 56-41-88

Учебное издание

Юрий Ефремович Кирпиченко
Александр Федорович Трофименко

**ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ
ТЕОРИЯ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
УПРАЖНЕНИЯ**

Издание подготовлено на ПЭВМ ООО "Инфотрибо"
Лицензии ЛВ № 413, ЛП № 205

Печатается по рекомендации секции "Трение и износ в машинах" Ученого Совета Института механики металлополимерных систем Академии наук Беларуси.

*Сдано в набор 4.03.95 г. Подписано в печать 4.12.96 г.
Формат издания 60×84 1/16. Бум. офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,25 Заказ № 5397 Тираж 1000 экз.

Издательство "Инфотрибо"
246652, Гомель, ул. Кирова, 32А

Полиграфические услуги выполнены
Речицкой укрупненной типографией
247500, г. Речица, ул. Урицкого, 19А