

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ,
ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

Монография

Тверь 2024

УДК 531.43+621.891
ББК 22.3:22.37:32.88я43

Рецензенты: главный научный сотрудник АО «ВНИИЖТ» д. т. н. Гершман И.С.; зав. кафедрой технологии и автоматизации машиностроения ТвГТУ, д. т. н., проф. Бурдо Г.Б.

Измайлов В.В., Новоселова М.В. Физические основы контактного взаимодействия, трения и изнашивания: монография / под общ. ред. В.В. Измайлова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2024. 172 с.

Рассмотрены физические основы науки о трении и изнашивании – трибологии. Уделено внимание характеристикам топографии поверхностей твердых тел, строению и свойствам поверхностных слоев, физическим методам исследования поверхности. Освещены вопросы механики и физики контактного взаимодействия деталей машин как составной части трибологии. Рассмотрены современные взгляды на физическую природу различных видов трения и механизмы изнашивания, описаны расчетные модели и аналитические зависимости для расчета фрикционных характеристик.

Предназначена для самостоятельной подготовки студентов, обучающихся по направлению 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (уровень магистратуры), и аспирантов (научная специальность подготовки научных и научно-педагогических кадров 2.5.3 Трение и износ в машинах), а также для студентов и аспирантов других специальностей и направлений в области инженерного дела, технологии и технических наук.

ISBN 978-5-7995-1323-8

© Тверской государственный
технический университет, 2024
© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

В далеком 1981 году в Калининском политехническом институте (ныне Тверской государственной технической университет) было опубликовано учебное пособие «Физические основы трения и износа машин» под редакцией Николая Борисовича Демкина, написанное им и его учениками – сотрудниками кафедры физики. Это было одно из первых отечественных учебных пособий по трению и изнашиванию, предназначенных для студентов с целью дать им первоначальные сведения о механике и физике данных процессов. С тех пор в трибологии (науке о трении и изнашивании) достигнуты большие успехи, появились новые разделы (например, нанотрибология), новые теоретические методы (молекулярная динамика); существенный прогресс достигнут в методиках и материально-техническом обеспечении экспериментальных исследований процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания. В прикладном плане успешно развивалась триботехника – научно-техническая дисциплина, рассматривающая практическое применение трибологии.

В настоящее время трибология или аналогичные курсы включены в учебные планы многих технических университетов. Выпущено множество учебных пособий, конспектов лекций, лабораторных практикумов по трибологической тематике. Данное издание отличается от аналогичных тем, что в соответствии с научным направлением Тверской научной школы, основанной Н.Б. Демкиным, значительное внимание в нем уделено механике и физике контактного взаимодействия технических поверхностей, лежащим в основе не только процессов трения и изнашивания, но и других контактных явлений, таких как контактная жесткость, контактный тепло- и электроперенос.

Ввиду ограниченного объема монографии авторы основное внимание уделили именно физическим основам процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания, оставляя за рамками рассмотрения прикладные аспекты (триботехнику, триботехнологии, трибоматериаловедение и т.п.).

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Роль трения в технике и повседневной жизни

Трение – универсальное явление, с которым мы постоянно сталкиваемся в технике и в повседневной жизни. По своей универсальности и роли в нашей жизни трение может сравниться, пожалуй, только с гравитацией. Если гравитация обеспечивает устойчивость мира по вертикали (и задает само направление этой вертикали), то трение делает то же самое по горизонтали. Беспомощность человека в отсутствие гравитации хорошо иллюстрируется кадрами с космической станции. Нечто подобное сопровождало бы нас при исчезновении трения. Невозможно было бы не только ездить, ходить, ползать, но и просто стоять. В полном соответствии с законами Ньютона при малейшем наклоне поверхности все, что на ней находится, та же неумолимая гравитация (точнее, касательная составляющая силы тяжести) увлекла бы под уклон без возможности вернуться, если только под рукой нет реактивного ранца. Если бы в мире без трения существовала жизнь, то живые существа передвигались бы подобно кальмарам, выбрасывая струю жидкости или газа в сторону, противоположную движению.

Впрочем, когда приводят все эти катастрофические последствия исчезновения трения, то хотят просто более наглядно показать его полезные проявления, понимая, что полное исчезновение трения невозможно. Это означало бы исчезновение из нашего мира другого фундаментального взаимодействия (наряду с гравитацией) – электромагнитного. Сила трения – нефундаментальная сила. Ее природа в конечном счете сводится именно к электромагнитному взаимодействию. Последнее проявляется в виде двух составляющих силы трения – молекулярной (адгезионной), как следствия взаимодействия молекул на границе соприкосновения трущихся тел, и деформационной, как сопротивления неровностей на поверхности контактирующих тел упругой или пластической деформации.

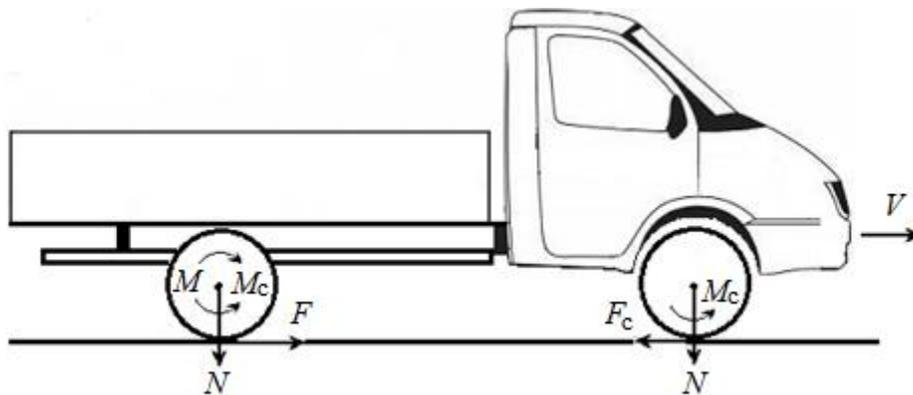
Однако принципиальная невозможность исчезновения сил трения из нашего мира не означает невозможности сведения их к минимуму при необходимости, равно как и увеличения в случае возникновения такой потребности.

Помимо полезных проявлений, пожалуй, не менее часто в повседневной жизни и технике силы трения играют отрицательную роль. Иногда эти две роли неразделимы. Проиллюстрируем это на примере автомобиля (рисунок).

Для ведущего колеса в отсутствие проскальзывания в общем случае можно записать

$$\frac{M - M_c}{R} = F = \psi N, \quad (1.1)$$

где M – крутящий момент, который создается на ведущей оси работающим двигателем посредством трансмиссии; M_c – суммарный момент сопротивления; R – радиус колеса; N – нормальная сила, совпадающая в данном случае с силой тяжести; ψ – коэффициент сцепления. Сила F – единственная внешняя сила, которая может сообщить ускорение автомобилю (при $M > M_c$). При $M = M_c$ сила $F = 0$ и автомобиль движется с постоянной скоростью. Вся энергия работающего двигателя в этом случае расходуется на преодоление сопротивления и в итоге превращается в тепло.



Силы при движении автомобиля

Для ведомого колеса очевидно, что $M = 0$, тогда уравнение (1.1) примет вид

$$-\frac{M_c}{R} = -F_c,$$

где сила F_c является силой сопротивления качению колеса.

По различным оценкам, на преодоление сил трения тратится не менее 1/4 производимой в мире энергии. По закону сохранения энергии израсходованная на преодоление трения энергия должна превратиться в какой-то другой вид. Более 90 % ее превращается в тепло и рассеивается в окружающее пространство. Существуют и другие каналы диссипации энергии при трении: разрушение материала при изнашивании, изменение структуры материала, электрические эффекты, акустические эффекты.

В числе негативных проявлений трения нельзя не упомянуть износ трущихся деталей. Считается, что более 80 % отказов современного оборудования обусловлено именно износом, а не поломкой деталей.

На восстановление или замену изношенных деталей за весь срок службы машины или механизма расходуются большие материальные, трудовые и финансовые ресурсы, в несколько раз превышающие стоимость нового изделия.

Специалист, занимающийся конструированием, изготовлением и эксплуатацией современного оборудования, должен обладать компетенциями в области состояния и возможных направлений развития науки о трении, изнашивании и смазке (трибологии) с целью создания высокоэффективных экологически безопасных технических систем.

1.2. Краткая историческая справка

Первые систематические исследования трения были выполнены Леонардо да Винчи на рубеже XV–XVI веков, т.е. почти за сто лет до трудов Г. Галилея по механике и без малого за двести лет до ньютоновых «Математических начал натуральной философии». В своих рукописях, помимо результатов опытов, Леонардо приводит многочисленные рисунки, иллюстрирующие методику экспериментов, что дает полное право считать эти рукописи научными трудами. Результаты его исследований трения состоят в следующем [1].

1. Сила трения не зависит от номинальной площади соприкосновения трущихся поверхностей. Правда, Леонардо делает оговорку, что это справедливо только для относительно гладких поверхностей.

2. Сила трения пропорциональна нормальной силе, прижимающей тела друг к другу, и составляет примерно $1/4$ веса (в данном случае Леонардо отождествляет нормальную силу с весом). Фактически Леонардо вводит понятие коэффициента трения. При этом он поясняет, что значение $1/4$ не является универсальным и справедливо только для гладких и плоских тел. Необходимо также отметить, что, не используя понятия нормальной силы, Леонардо интуитивно понимает, что именно она определяет величину силы трения. Об этом говорят его эксперименты по трению тел на наклонной плоскости. Леонардо приходит к заключению, что чем круче наклонная плоскость, тем меньше сила трения при тех же условиях, и это можно объяснить уменьшением нормальной силы. Тело, прилегающее к вертикальной поверхности (но не прижатое к ней), не испытывает трения вовсе. Таким образом, Леонардо вплотную подошел к разложению силы тяжести, действующей на тело на наклонной плоскости, на нормальную и касательную составляющие, причем именно первая составляющая определяет силу трения [1].

3. Сила трения зависит от материала трущихся поверхностей (от сочетания твердостей компонентов пары трения) и от состояния поверхности трения (гладкая или шероховатая, сухая или влажная).

4. Сила трения качения меньше силы трения скольжения. Более того, Леонардо установил, что сила трения качения уменьшается с увеличением диаметра катка, предвосхищая тем самым закон трения качения Ш. Кулона.

К сожалению, результаты работ Леонардо да Винчи по исследованию трения и практические способы его уменьшения оставались неизвестными вплоть до XVIII века. Часть рукописей, касающихся изучения трения, была обнаружена только в 1967 году. Поэтому неудивительно, что двести лет спустя, на рубеже XVII и XVIII веков, французский ученый Г. Амонтон (*G. Amontons*) вновь открыл многое из того, что Леонардо изложил в своих рукописях.

Амонтон формулирует один из основных законов внешнего трения, носящий его имя, – о пропорциональности сопротивления, вызванного трением, давлению, считая это сопротивление примерно равным $1/3$ давления. В современной записи закон трения Амонтона выглядит так:

$$F_{тр} = fN,$$

где $F_{тр}$ и N – силы трения и нормального давления соответственно; f – коэффициент трения. Амонтон считает $f = 1/3$, но при этом отмечает, что сила трения находится в сложной зависимости от нормального давления, времени и скорости скольжения [2]. Амонтон также полагает, что сила трения не зависит от номинальной площади контакта трущихся тел.

Не умаляя заслуг Г. Амонтона, следует отметить, что к проблемам трения он обратился в известной степени случайно, наблюдая за работой полировщиков стекол и пытаясь оценить эффективность этой работы. В 1699 году в трудах Академии наук он публикует статью «О причине сопротивления в машинах» («*De la resistance causée dans les machines*») с формулировкой открытых им законов [3] и более не возвращается к проблемам трения.

Соотечественник Г. Амонтона, знаменитый французский ученый Ш. Кулон (*Ch. Coulomb*), подходил к исследованию трения вполне целенаправленно, в связи с практическими запросами. Например, одна из таких задач заключалась в определении силы трения покоя и скольжения при спуске судов со стапелей. За эти исследования Кулон в 1781 году был удостоен премии Академии наук. В 1785 году выходит в свет работа «Теория простых машин» («*Théorie des machines simples*»), в которой Кулон описывает результаты своих исследований трения. Дополненный вариант этой работы публиковался еще дважды – в 1809 и 1821 годах, что свидетельствует о востребованности полученных Кулоном результатов.

Кулон уточняет закон Амонтона, придавая ему вид двучленного выражения:

$$F_{тр} = fN + A. \quad (1.2)$$

Наличие в формуле (1.2) постоянной A – составляющей силы трения, не зависящей от нормальной нагрузки, – по современным представлениям, отражает результат адгезионного (молекулярного) взаимодействия трущихся тел. Сам Кулон, разумеется, таких терминов не употребляет и говорит о некоей «сцепленности» тел [2].

Примечательно, что ранее (в 1773 году) аналогичное по форме и смыслу двучленное уравнение было применено Кулоном к расчету прочности связных грунтов [3]:

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma_n,$$

где τ – предельное касательное напряжение (прочность грунта при сдвиге); σ_n – нормальное напряжение; τ_0 – сдвиговая прочность при $\sigma_n = 0$ (удельное сцепление в механике грунтов); μ – коэффициент внутреннего трения. Это выражение широко используется в механике грунтов (и не только) до настоящего времени и известно как условие (критерий) прочности Кулона [4].

Не ограничившись трением скольжения, Кулон предложил уравнение, описывающее силу трения качения:

$$F_{тр} = \lambda \frac{N}{R},$$

где λ – коэффициент трения качения с размерностью длины; N – нормальная сила; R – радиус катка. В отличие от эмпирического выражения (1.2) для трения скольжения, данная формула получена Кулоном теоретически на основании законов механики (см. разд. 6.8).

Кулон заслуженно считается основателем науки о трении. Тем не менее справедливости ради отметим, что многие из результатов Кулона предвосхитил Л. Эйлер (*L. Euler*), швейцарец по происхождению, член Российской академии наук, значительную часть своей жизни проведший в России. Его работы «О трении твердых тел» («*Sur le frottement des corps solides*») и «Об уменьшении сопротивления трения» («*Sur la diminution de la résistance du frottement*») вышли из печати в 1750 году, когда Кулону исполнилось 14 лет. В них Эйлер пишет о независимости силы трения от номинальной площади контакта и о том, что эта сила составляет часть от силы нормального давления [5] (тут Эйлер не совсем прав, может быть и $F_{тр} > N$). По-видимому, Эйлер первый дал четкое определение силы трения как силы, противоположной направлению движения тела и лежащей в плоскости соприкосновения трущихся тел. Он также разделил

трение покоя и трение скольжения и указал, что максимальная сила трения покоя может превосходить силу трения скольжения [5].

Эйлер вывел формулу (1765 год), устанавливающую соотношение сил при трении гибкой связи (нити, ленты, каната, ремня) по цилиндрическому телу:

$$T_2 = T_1 e^{f\alpha},$$

где T_2 и T_1 – силы натяжения в ветвях гибкой связи; f – коэффициент трения связи о цилиндрическое тело; α – угол охвата.

В конце XIX – начале XX века Н.П. Петров, О. Рейнольдс (*O. Reynolds*), Р. Штрибек (*R. Stribeck*), А. Зоммерфельд (*A. Sommerfeld*) заложили основы гидродинамической теории жидкостного трения. Большое значение для расчетов конструкций (и узлов трения в том числе) имели труды Г. Герца (*H. Hertz*) по контактными задачам теории упругости (1881–1882 годы), которые до сих пор широко цитируются в научных публикациях.

В начале XX века появляются первые физические теории трения. Наиболее часто упоминаемые из них – теория Томлинсона, или Прандтля – Томлинсона (*L. Prandtl, G. Tomlinson*), 1928–1929 годы [6], и Френкеля – Конторовой (Я.И. Френкель и Т.А. Конторова, 1938 год) [7]. В этих моделях трение рассматривается на атомарном уровне и устанавливаются каналы диссипации энергии при трении.

На макроскопическом уровне к середине XX века получила признание молекулярно-механическая (адгезионно-деформационная) теория трения И.В. Крагельского и Ф. Боудена и Д. Тэйбора (*F. Bowden, D. Tabor*). Согласно этой модели, сопротивление относительному скольжению твердых тел вызвано двумя причинами: молекулярным (адгезионным) взаимодействием контактирующих тел и деформацией шероховатости их поверхностей.

К середине XX века, с одной стороны, были достигнуты немалые успехи в теоретическом и прикладном изучении процессов трения и изнашивания, а с другой – в связи с техническим прогрессом пришло понимание необходимости уделять больше внимания проблемам трения и изнашивания. В этом плане для науки о трении знаменателен 1966 год, когда группой специалистов под руководством профессора П. Джоста (*P. Jost*) Министерству образования и науки Великобритании был представлен доклад о современном состоянии науки о трении и изнашивании и потребностях промышленности в этой области. В этом докладе использован термин «трибология». Таким образом наука о трении и изнашивания обрела собственное имя. Корни его греческие: τριβη обозначает «трение», λογος – «учение». Аналогичный по значению латинский корень от слова *frictio* («трение») присутствует в распрост-

раненном прилагательном «фрикционный» (фрикционные материалы, фрикционные передачи и др.).

С начала XXI века успешно развивается новое направление – нанотрибология. Переходу на атомарный уровень трибология обязана, во-первых, появлению таких экспериментальных методов исследования и соответствующего аппаратного обеспечения, как сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомная силовая микроскопия (АСМ) и ее разновидность – фрикционная силовая микроскопия (*FFM*), аппарат для измерения поверхностных сил (*SFA*) [8, 9]. Во-вторых, теоретические трибологические модели успешно строятся с использованием методов компьютерной молекулярной динамики (*MD*), позволяющих моделировать взаимодействие контактирующих поверхностей на молекулярном уровне [10]. Развитию нанотрибологии способствует и практическая потребность в ее результатах, вызванная микроминиатюризацией технических устройств, таких, как микро- и наноэлектромеханические системы (соответственно МЭМС и НЭМС) [11].

1.3. Междисциплинарный характер трибологии

Трибология, безусловно, не является фундаментальной наукой. В номенклатуре научных специальностей, утвержденной Министерством науки и образования Российской Федерации, специальность «Трение и износ» относится к техническим наукам. Однако без применения законов, принципов и методов фундаментальных естественных наук ни одна прикладная наука в настоящее время развиваться не может. Это в полной мере относится и к трибологии. В своем развитии она опирается на такие фундаментальные науки, как физика, химия, биология, математика, а также на достижения прикладных наук.

Физика имеет важнейшее значение для трибологии. Во-первых, в ее задачи входит создание и развитие физических моделей трения на атомарном уровне. Особенное значение эти модели приобретают в связи с развитием нанотрибологии. Во-вторых, многие технологические методы обработки деталей узлов трения используют физические эффекты и явления, например лазерные, электронно-лучевые, электрофизические методы. В-третьих, практически все применяемые сегодня методы исследования поверхностей твердых тел, без которых невозможно представить себе современную трибологию, стали доступны только благодаря успехам физики.

Химия в трибологии применяется для изучения взаимодействия поверхностей трения с химическими активными компонентами окружающей среды и рабочих сред. Сюда относятся процессы образования поверхностных химически адсорбированных пленок (оксидных, суль-

фидных и др.), процессы коррозионно-механического изнашивания (окислительного, водородного, фреттинг-изнашивания), взаимодействия поверхностей с поверхностно-активными веществами и т.п. Химические процессы в поверхностных слоях трущихся тел активируются большим количеством энергии, выделяющейся при трении. В трибохимии отдельным разделом можно выделить химмотологию – науку об эксплуатационных свойствах, качестве и рациональном применении в технике топлив, масел, смазочных материалов и специальных жидкостей.

Биология нашла применение в трибологии сравнительно недавно, но весьма успешно. Например, большое внимание сейчас уделяется практическому использованию трибологии в эндопротезировании суставов. Основной задачей биотрибологии в области эндопротезирования является повышение трибологического ресурса эндопротезов. В решении этой задачи большую роль играет подбор оптимального сочетания материалов эндопротезов суставов, изучение механизмов смазочного действия синовиальной жидкости, обеспечение совместимости материалов искусственного сустава и др.

Математика в трибологии, как и в других точных науках, применяется в первую очередь для аналитического описания тех закономерностей и расчетных методик, которые являются результатом научных исследований. Для описания топографии поверхностей на различных масштабных уровнях используются теории случайных процессов и случайных полей. Для этих же целей успешно применяются методы фрактальной геометрии. Вероятностно-статистические методы используются для описания процесса изнашивания, для расчета и прогнозирования ресурса триботехнических узлов. Широко применяются в трибологии методы математического моделирования. Одним из примеров таких методов, бурно развивающихся в настоящее время, является молекулярная динамика. Этот метод компьютерного моделирования позволяет описать в динамике поведение ансамбля взаимодействующих атомов на основании решения уравнений их движения. Он успешно применяется в физике поверхностей и нанотрибологии и имеет широкие перспективы.

Из прикладных наук в первую очередь следует выделить материаловедение.

Материаловедение в трибологии используется для установления связи между составом, строением, свойствами материалов и их триботехническими характеристиками. Эти знания необходимы для создания конструкционных и функциональных материалов с заданными свойствами, для разработки технологий повышения износостойкости триботехнических материалов, методов контроля и диагностики состава и структуры материалов.

Экология также находит свою область применения в трибологии. Так, по данным авторов статьи [12], 23 % мирового потребления энергии приходится на узлы трения, из них 20 % – на преодоление трения и 3 % – на восстановление изношенных деталей. Использование новых материалов и технологий в трибологии может дать экономию в энергопотреблении до 18 % в ближайшие 8 лет и до 40 % в ближайшие 15 лет, что должно привести к снижению теплового загрязнения атмосферы и выбросов парниковых газов.

Другой пример: ежегодно в мире требуют утилизации десятки миллионов тонн отработанных смазочных материалов, в связи с чем разработка экологически чистых масел – актуальная задача трибологии.

Практические аспекты применения трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации трибосистем объединяет в себе *триботехника*, которую иногда рассматривают как прикладной раздел трибологии, а иногда – как самостоятельную науку. Триботехника включает в себя триботехнологии, трибомониторинг, трибоинформатику.

Триботехнологии – направление в технологии машиностроения, включающее, во-первых, технологии получения поверхностей трения с требуемыми характеристиками. Иногда совокупность таких технологий объединяют термином «инженерия поверхностей» [13]. Технологические методы инженерии поверхностей включают:

- изменение физико-химических свойств поверхностных слоев материалов путем модифицирования;

- нанесение пленок, покрытий, защитных слоев;

- управление микротопографией поверхностей.

Во-вторых, это технологические процессы, в основе которых лежит сам процесс трения. Примерами могут служить сварка трением, метод ротапринтной смазки или так называемая финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО). Метод ротапринтной смазки основан на фрикционном переносе твердосмазочного материала со специального смазывающего тела на поверхность трения. В методе ФАБО на поверхности детали формируется тонкая пленка из мягкого металла – латуни, бронзы, медного сплава – за счет его фрикционного переноса на обрабатываемую деталь.

Трибомониторинг, в свою очередь, включает в себя *трибометрию* и *трибодиагностику*.

Предмет трибометрии – измерение и контроль фрикционных характеристик: сил или моментов трения, величины износа, объемной и поверхностной температуры деталей фрикционной пары, контактной деформации, электрического и термического сопротивления контакта, параметров топографии поверхности и т.д. В предмет трибометрии также входят трибологические испытания, разработка соответствующих методик и нормативных документов, содержащих требования к образцам, приборам и оборудованию.

Трибодиагностика обеспечивает контроль параметров узлов трения в процессе эксплуатации. Для этого применяются различные физические методы – акустические, электрические, радиоактивные, температурные, анализ частиц износа и др.

Трибоинформатика охватывает сбор, передачу, обработку, представление трибологической информации. Для этих целей широко используются компьютерные технологии, с помощью которых создаются трибологические информационные системы, включающие в себя соответствующие базы данных и экспертные системы, содержащие базы знаний [14].

1.4. Основные термины и определения

Основные термины и определения образуют понятийный аппарат трибологии. Трибология хотя и прикладная наука, но по своей сути – наука точная, поэтому используемые ею термины и понятия должны иметь четкое определение, исключающее возможность их неверного истолкования. Обширный перечень трибологических терминов содержит ГОСТ 27674-88, действующий на момент написания данной монографии. Ниже приведены основные термины и их определения согласно этому стандарту.

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

Трение покоя – трение двух тел при микросмещениях без макросмещения.

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

Трение движения – трение двух тел, находящихся в движении относительно друг друга.

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

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

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

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

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

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

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

Скорость изнашивания – отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник. Различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю (за определенный интервал времени) скорость изнашивания.

Интенсивность изнашивания – отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы. Единицу объема выполненной работы выбирают в каждом отдельном случае. Различают мгновенную и среднюю интенсивности изнашивания.

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

Относительная износостойкость – отношение интенсивности изнашивания одного материала к интенсивности изнашивания другого в одинаковых условиях. Обычно один из материалов принимается за эталон.

Схватывание при трении – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

Перенос материала – явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

Заедание – процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. Заедание может завершаться прекращением относительного движения.

Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

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

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшаются износ, повреждения поверхности и (или) сила трения.

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

Список литературы к главе 1

1. Гуковский М.А. Механика Леонардо да Винчи. М.: ЛЕНАНД, 2018. 832 с.
2. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. М.: Издательство Академии наук СССР, 1956. 236 с.
3. Попова Е., Popov V.L. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction // Friction. 2015. V. 3. No. 2. P. 183–190.
4. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии): учебник для вузов. СПб.: Лань, 2022. 416 с.
5. Журавлев В.Ф. 500 лет истории закона сухого трения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2014. № 2. С. 21–31.
6. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
7. Браун О.М., Кившарь Ю.С. Модель Френкеля – Конторовой. Концепции, методы, приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 536 с.
8. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
9. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.
10. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун [и др.]. М.: Издательство ЛКИ, 2014. С. 320–366.
11. Мышкин Н.К., Горячева И.Г. Трибология: тенденции полувекового развития // Трение и износ. 2016. Т. 34. № 4. С. 665–669.
12. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // Friction. 2017. V. 5. Iss. 3. P. 263–284.
13. Иванов И.А., Губенко С.В., Кононов Д.П. Поверхность деталей машин и механизмов: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 156 с.
14. Захаров С.М., Евельсон Л.И. Компьютерная трибология // Трибология. Состояние и перспективы: сб. науч. тр. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. Т. 1. С. 239–247.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

С математической точки зрения поверхность – двумерный объект, не имеющий толщины. С точки зрения физики поверхность – это граница раздела двух фаз (например, твердой и газообразной, твердой и жидкой), на которой изменяются физические, механические, химические свойства, присущие данной фазе. В этом случае правильнее говорить о поверхностном слое, толщина которого, по крайней мере, соизмерима с размерами атома или молекулы данного вещества. К тому же поверхности реальных твердых тел имеют дефекты – вакансии, примесные атомы, выходы дислокаций, атомные ступени и др. Для технических поверхностей, в частности поверхностей трущихся деталей, картина еще более сложная. В приповерхностных слоях толщиной от нескольких нанометров до долей миллиметра и более свойства материала могут кардинально отличаться от свойств материала в объеме. Так, после некоторых видов механической обработки или в результате изнашивания металл в приповерхностном слое может находиться в аморфном состоянии (так называемый слой Бейлби). И наоборот, полярные молекулы жидких углеводородов (например, жирных кислот) в тонких слоях на поверхности металла образуют квазикристаллическую структуру. Все эти особенности строения и свойств приповерхностных слоев оказывают решающее влияние на процессы контактного взаимодействия, трения и изнашивания и усложняют их экспериментальные исследования и теоретическое описание.

2.1. Структура поверхностных слоев

Схематически строение поверхностного слоя металлов в самом общем случае можно представить в виде нескольких чередующихся более тонких слоев различной толщины (рис. 2.1).

Общая толщина поверхностного слоя с измененными кристаллической структурой, физико-механическими и химическими свойствами может достигать до нескольких сотен микрометров, из них суммарная толщина адсорбированных слоев – от единиц до сотен нанометров. В зависимости от технологии изготовления детали, состава и характеристик окружающей среды структура поверхностного слоя может меняться, но в том или ином виде его наличие неизбежно. Получить атомарно чистую (так называемую ювенильную), свободную от поверхностных пленок поверхность твердого тела чрезвычайно трудно. Рассмотрим наиболее известные способы получения таких поверхностей [1, 2].

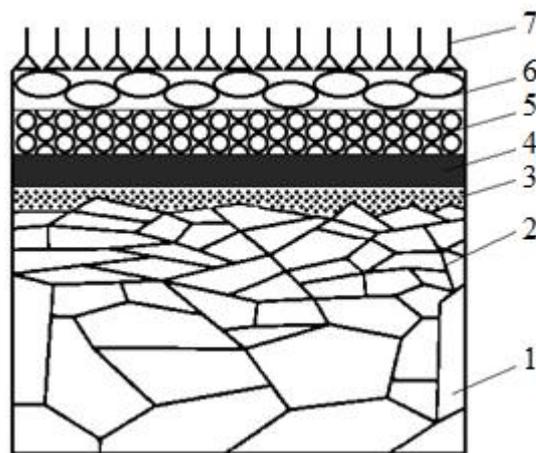


Рис. 2.1. Схематическое изображение строения поверхностного слоя металла:
 1 – недеформированный металл; 2 – деформированный металл; 3 – аморфный металл;
 4 – оксиды; 5 – физически адсорбированные молекулы газов;
 6 – адсорбированная влага; 7 – адсорбированные органические молекулы

Ионная бомбардировка (травление) поверхности. Очищаемая поверхность бомбардируется ионами с энергией порядка 1 кэВ. Обычно используются ионы инертных газов (например, аргон). К недостаткам этого способа относятся насыщение поверхностного слоя ионами инертного газа и образование большого количества структурных дефектов, так что поверхностный слой может даже аморфизироваться. Для восстановления кристаллической структуры необходим последующий отжиг.

Раскалывание в сверхвысоком вакууме. Метод применим только к хрупким кристаллам, для металлов он неприменим. Кроме того, в результате раскалывания на получившихся образцах чистой является только одна поверхность. Тыльная и боковые стороны остаются загрязненными. Они могут стать источниками загрязнения вновь образовавшейся поверхности.

Прогрев в сверхвысоком вакууме. Нагревание активирует процесс десорбции физически адсорбированных молекул из окружающей атмосферы. Очевидно, что этот метод применим только для достаточно тугоплавких материалов, температура плавления которых выше температуры десорбции адсорбированных молекул. Нагревание может привести к изменению химического и фазового состава твердого тела. Некоторые адсорбированные поверхностные пленки не удаляются даже при нагревании до температур, близких к температуре плавления. Примером может служить углерод на поверхности вольфрама и молибдена [1].

Резюмируя, следует признать, что универсального, простого и эффективного способа очистки поверхности твердого тела не существует.

2.2. Поверхностная энергия

Зависимость силы взаимодействия двух атомов или молекул от расстояния между ними схематически показана на рис. 2.2.

Для того чтобы преодолеть силы притяжения атомов или молекул и удалить их на бесконечное расстояние, необходимо совершить работу (заштрихованная площадь).

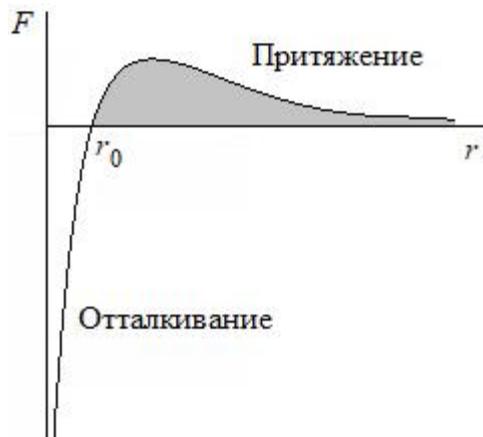


Рис. 2.2. Зависимость силы взаимодействия атомов (молекул) F от расстояния r между ними: r_0 – равновесное расстояние

Для того чтобы кристалл в вакууме разделить на две части, как схематически показано на рис. 2.3, надо преодолеть силы взаимодействия большого числа атомов или молекул на поверхности вновь образующихся тел. Работа образования единицы площади поверхности считается равной удельной поверхностной энергии.

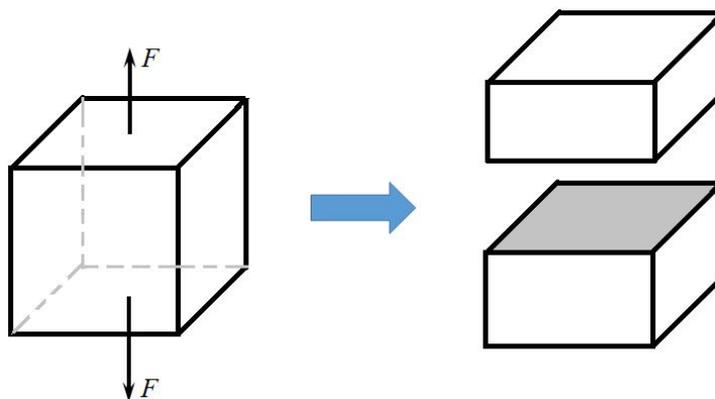


Рис. 2.3. Образование новых поверхностей при разрушении кристалла

Наличием поверхностной энергии обусловлены, в частности, такие поверхностные явления, как адсорбция и адгезия, играющие большую роль в процессах трения и изнашивания.

Для металлов типичные значения поверхностной энергии γ имеют порядок нескольких джоулей на квадратный метр (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Ориентировочные значения поверхностной энергии металлов

Металл	Al	Ag	Au	Cr	Cu
γ , Дж/м ²	0,9–1,3	1,0–1,2	1,2–1,5	2,1–2,4	1,4–1,8
Металл	Fe	Mo	Pt	W	Zn
γ , Дж/м ²	1,7–2,1	1,9–2,7	1,6–2,0	2,6–3,2	0,8–0,9

Характеристикой прочности молекулярных связей в кристаллах служит энергия когезии – энергия, необходимая для того, чтобы перевести вещество из кристаллического состояния в газообразное с бесконечно большим расстоянием между молекулами.

Исходя из приведенных выше определений поверхностной энергии и энергии когезии, логично предположить их взаимную корреляцию. Действительно, для большинства металлов поверхностная энергия равна примерно 1/6 энергии когезии [3]. Рис. 2.4 иллюстрирует эту корреляцию.

В свою очередь, энергия когезии E_{coh} практически равна энергии сублимации $E_{субл}$ (рис. 2.5), поэтому существует тесная корреляция поверхностной энергии с энергией сублимации металлов (рис. 2.6).

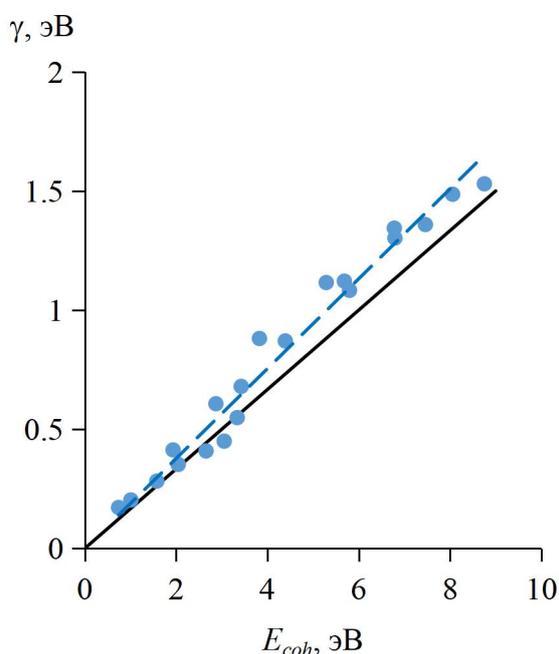


Рис. 2.4. Сравнение величин γ и E_{coh} для металлов по данным [3]: пунктирная линия – линейная регрессия $\gamma = 0,189E_{coh}$; сплошная – $\gamma = (1/6)E_{coh}$

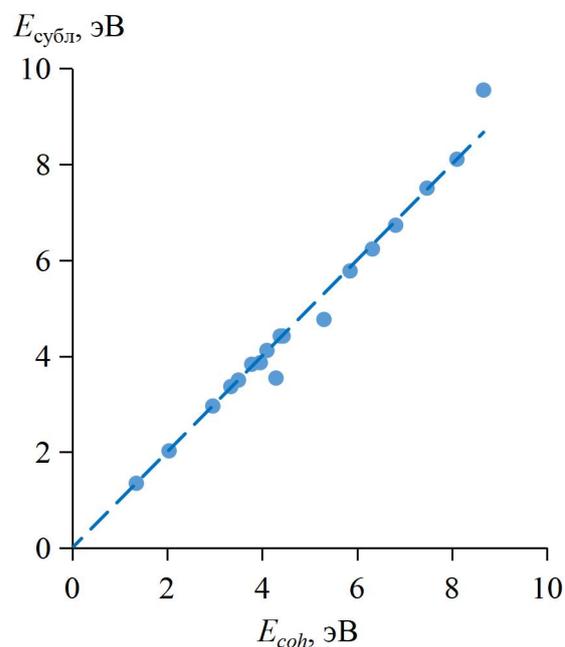


Рис. 2.5. Корреляция энергии когезии с теплотой сублимации для металлов

Величины поверхностной энергии, близкие к 1/6 энергии сублимации, оценочно дает также термодинамическая вакансионная модель [4, 5], согласно которой мерой поверхностной энергии металла является избыточная величина химического потенциала вакансий в поверхностном слое по сравнению с объемом металла.

Для более точного расчета величины поверхностной энергии рекомендуется формула [6]

$$\gamma \approx 0,15 \left(\frac{\mu \rho^2}{N_A} \right)^{\frac{1}{3}} \Delta H_{исп} \quad (2.1)$$

где γ – удельная поверхностная энергия, Дж/м²; μ – молярная масса; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро; $\Delta H_{исп}$ – удельная теплота испарения, Дж/кг. Сравнение экспериментальных и расчетных (по формуле (2.1)) значений поверхностной энергии показывает их хорошее соответствие (рис. 2.7).

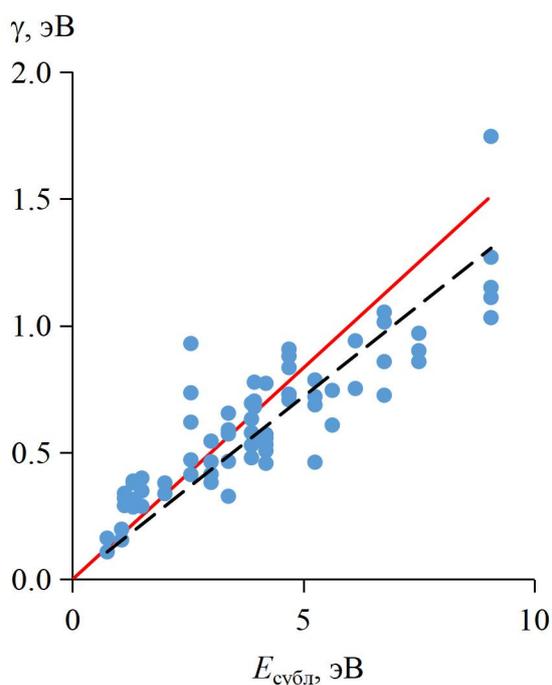


Рис. 2.6. Корреляция поверхностной энергии металлов и теплоты сублимации: сплошная линия – зависимость $\gamma = (1/6)E_{субл}$; пунктирная – линейная регрессия $\gamma = bE_{субл}$, где $b = 0,144 \pm 0,008$

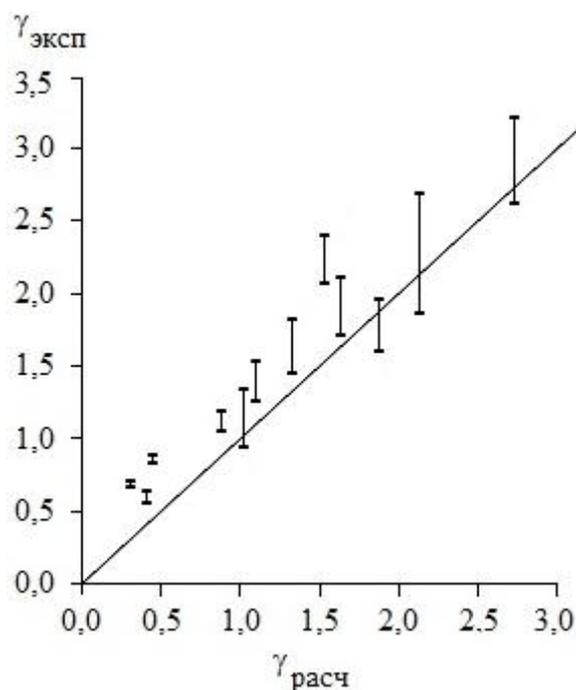


Рис. 2.7. Сравнение расчетных $\gamma_{расч}$ и экспериментальных $\gamma_{эксп}$ значений поверхностной энергии, Дж/м²: линия – $\gamma_{эксп} = \gamma_{расч}$

2.3. Адгезия контактирующих поверхностей

Адгезия в переводе с латыни означает «прилипание», «сцепление». Молекулярная адгезия по природе аналогична когезии, но, в отличие от последней, наблюдается в контакте разнородных тел.

Два нейтральных атома притягиваются посредством сил Ван-дер-Ваальса, что можно описать так называемым потенциалом Леннарда-Джонса (потенциал 6-12):

$$U = \frac{C_1}{r^{12}} - \frac{C_2}{r^6}, \quad (2.2)$$

где U – потенциальная энергия взаимодействия; C_1 и C_2 – константы; r – расстояние между атомами. Производная от этой энергии $F = -\frac{dU}{dr}$ есть сила взаимодействия атомов (см. рис. 2.2), которая при $r > r_0$ является силой притяжения. Чтобы преодолеть эту силу при разъединении контактирующих тел, необходимо затратить энергию $\Delta\gamma$.

Энергия (работа) адгезии $\Delta\gamma$ определяется как работа изотермического обратимого разделения двух конденсированных фаз вдоль межфазной поверхности единичной площади. В результате исчезает межфазная граница с энергией γ_{12} и появляются границы раздела двух фаз с газом с энергиями γ_1 и γ_2 . Поэтому в общем случае величина $\Delta\gamma$ рассчитывается по формуле

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12},$$

где γ_1, γ_2 – удельные поверхностные энергии материалов контактирующих поверхностей; γ_{12} – межфазная удельная энергия. Для одинаковых материалов с идеально совпадающими кристаллическими решетками (т.е. фактически при отсутствии границы раздела) $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_1 = \gamma_2$ и $\Delta\gamma = 2\gamma_1$.

Для металлических поверхностей типичные значения $\gamma_1 = 1-3$ Дж/м². Но эти значения справедливы для контакта атомарно чистых поверхностей (т.е. когда адгезия обусловлена металлическими связями) с совпадающими кристаллическими решетками, находящихся в непосредственном контакте. В реальных контактах эти условия, очевидно, практически никогда не выполняются, поэтому указанные значения следует рассматривать как верхнюю оценку величины энергии адгезии в контакте.

Одной из причин уменьшения энергии адгезии является несовпадение кристаллических решеток контактирующих материалов из-за различной ориентации кристаллографических осей, отличающихся параметров решеток (контакт разнородных материалов), дефектов решеток. В этом случае энергия адгезии может снижаться до полутора раз [7].

Величина межфазной удельной энергии γ_{12} может быть ориентировочно оценена по формуле [8]

$$\gamma_{12} \approx (0,25-0,5)(\gamma_1 + \gamma_2).$$

При $\gamma \sim 1$ Дж/м² межфазная энергия $\gamma_{12} \sim 0,5-1$ Дж/м², что достаточно хорошо согласуется с данными работы [7]: $\gamma_{12} \approx 0,5-0,7$ Дж/м².

Для контакта одинаковых материалов в качестве грубой оценки величины γ_{12} можно принять энергию межзеренных границ, которая может достигать 30–40 % от величины поверхностной энергии [9, 10]. По данным работы [11], средние значения границ зерен для металлов составляют: для алюминия 0,4–0,6 Дж/м²; для меди 0,65 Дж/м²; для никеля 0,6–0,8 Дж/м², что примерно соответствует приведенным выше процентным соотношениям.

Второй причиной уменьшения энергии адгезии может быть присутствие на поверхности адсорбированных молекул. Для примера можно сослаться на данные работы [12]: даже на поверхности золота толщина адсорбированных пленок на воздухе при относительной влажности 30–70 % составляет 5–8 нм. Энергия взаимодействия поверхностей с адсорбированными пленками в основном определяется свойствами этих пленок даже в случае мономолекулярных слоев [7].

Третьей причиной снижения энергии адгезии, на которую указывают, например, авторы работы [13], может быть атомарная шероховатость (субнанометровых масштабов) на неровностях нанометрового масштаба.

Другая разновидность адгезии, помимо молекулярной, – капиллярная адгезия. Она проявляется в контакте твердых тел в присутствии влаги в контактном зазоре. Для этого требуется, чтобы жидкость смачивала контактирующие тела. Например, в контакте двух цилиндрических тел с радиусами R (рис. 2.8) при $R \gg R_k$ сила притяжения вследствие капиллярного эффекта

$$F \approx \frac{A\gamma_l}{R_k} = \frac{\pi R^2 \gamma_l}{R_k},$$

где A – площадь контакта; γ_l – поверхностное натяжение жидкости; R_k – радиус капиллярного мостика.



Рис. 2.8. Контактующие тела 1 и 2 с прослойкой смачивающей жидкости 3

2.4. Адсорбция на поверхности твердого тела

Поверхность твердого тела в обычных условиях всегда покрыта слоем посторонних молекул из граничащей с ним атмосферы. Концентрирование молекул газа (адсорбата) на поверхности твердого тела (адсорбента) относится к явлению адгезии и связано с наличием поверхностной энергии твердого тела, которая уменьшается в результате адсорбции. Если предположить, что каждое соударение молекулы газа с поверхностью твердого тела приводит к адсорбции (коэффициент аккомодации равен 1), то в нормальных атмосферных условиях (т.е. при давлении порядка 760 мм рт. ст. и температуре порядка 300 К) поверхность твердого тела покрывается монослоем атмосферных газов (азота, кислорода) за несколько наносекунд. В высоком вакууме (при давлении $p \approx 10^{-6}$ мм рт. ст.) это время составляет порядка нескольких секунд, и только в сверхвысоком вакууме ($p < 10^{-9}$ мм рт. ст.) оно увеличивается до нескольких десятков минут.

Принято различать физическую и химическую адсорбцию. При физической адсорбции молекулы адсорбата связываются с поверхностью адсорбента относительно слабые силы Ван-дер-Ваальса, поэтому теплота адсорбции (энергия, выделяющаяся при образовании молекулярной связи) находится в диапазоне от сотых до десятых долей электронвольт (обычно не более 0,25 эВ). Толщина физически адсорбированных слоев на металлах в воздухе зависит от влажности атмосферы и составляет несколько нанометров (табл. 2.2) [14].

Таблица 2.2. Толщина адсорбированных слоев, нм

Относительная влажность, %	Адсорбент		
	Золото	Корунд Al_2O_3	Кремнезем SiO_2
30	5,2–5,6	2,3–3,0	2,5–2,8
50	6,6–7,0	3,4–3,7	3,3–3,7
70	7,6–8,0	4,2–4,5	4,0–4,4

При химической адсорбции (хемосорбции) между молекулами адсорбента и адсорбата образуется химическая связь, т.е. происходит химическая реакция с образованием нового вещества. На поверхности металлов это чаще всего оксиды, а также сульфиды. Теплота хемосорбции гораздо выше теплоты физической адсорбции и лежит в диапазоне примерно 0,8–8 эВ.

В табл. 2.3 приведены данные по составу и толщине поверхностных пленок на некоторых металлах, определенные различными способами [6]: эллипсометрией (ЭМ), оже-электронной спектроскопией (ОЭС) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (РФЭС).

Таблица 2.3. Толщина и состав поверхностных пленок на металлах

Металл		Температура, °С			
		20	50	100	150
Медь М1	Толщина, нм	2,0 ¹	10 ¹	44 ¹ ; 35–50 ²	110 ¹
	Состав ³	Cu ₂ O; Cu ₂ S			
Латунь ЛС59-1	Толщина, нм	1,0 ¹	1,5 ¹	13,0 ¹	16,5 ¹
	Состав ³	Cu ₂ O/ZnO = 2/1		Cu ₂ O/ZnO = 1/1	Cu ₂ O/ZnO = 2/5
Алюминий	Толщина, нм	3,0 ¹		4,5–6,5 ¹ ; 7,5 ²	4,5–6,5 ¹ ; 9,0 ²
	Состав ²	Al ₂ O ₃			
Спав АД31	Толщина, нм	3,0 ¹		7,5–8,0 ¹ ; 8,0 ²	7,5–8,0 ¹ ; 9,0 ²
	Состав ²	Al ₂ O ₃			

Примечание. ¹ – ЭМ; ² – ОЭС; ³ – РФЭС.

Сопоставимые величины толщин оксидных пленок на металлах приводят авторы работы [15]: в атмосфере сухого воздуха при комнатной температуре толщина оксидных пленок на меди порядка 1 нм, на железе – 1,5–2,5 нм, на нержавеющей стали – 1–2 нм, на алюминии – 10–15 нм.

Образующиеся окисные пленки на поверхности металла могут обладать защитным действием, и после того, как на металлах образуется пленка некоторой толщины, дальнейший рост ее практически прекращается. Так происходит, если оксид занимает больший объем, чем объем металла, из которого он образовался. В этом случае образующаяся пленка плотная и с ростом ее толщины диффузия ионов металла на поверхность пленки или атомов кислорода внутрь оксида затрудняется. Поэтому скорость окисления можно считать обратно пропорциональной толщине пленки δ :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{k}{\delta}, \quad (2.3)$$

где k – константа окисления.

Интегрирование уравнения (2.3) при начальном условии $\delta(0) = 0$ приводит к так называемому параболическому закону роста толщины пленки:

$$\delta^2 = k_p t. \quad (2.4)$$

Если объем оксида меньше объема металла, из которого он образуется, то оксидная пленка рыхлая, пористая и не обладает защитным действием. В этом случае скорость окисления не зависит от толщины пленки:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_l \quad (2.5)$$

и закон ее роста линейный:

$$\delta = k_l t \quad (2.6)$$

при $\delta(0) = 0$. В формулах (2.4) и (2.5) k_p и k_l – константы соответствующих законов окисления.

Наряду с параболическим (2.4) и линейным (2.6) законами окисления часто встречается логарифмический закон, особенно при низких температурах:

$$\delta = k_1 \lg(k_2 t + k_3), \quad (2.7)$$

где k_1 , k_2 и k_3 – константы.

Линейному закону (2.6) подчиняется окисление легких металлов: Na, Ca, Mg, параболическому закону (2.4) – высокотемпературное окисление металлов: Cu, Al, Fe, Pb, Ti, V, Mo, W. Низкотемпературное окисление большинства металлов подчиняется логарифмическому закону (2.7) (рис. 2.9). Стали до 400 °С окисляются по логарифмическому закону, до 700 °С – по степенному (аналог параболического с показателем степени $n > 2$), при температурах больше 700 °С – по параболическому [15].

Кроме оксидных пленок, на поверхности твердых тел могут образовываться сульфидные, водяные, полимерные пленки. Последние возникают в результате адсорбции на поверхности твердых тел паров масел или других органических соединений и их последующей полимеризации. Металл часто играет роль катализатора в реакции полимеризации. Такие пленки обладают высокой прочностью.

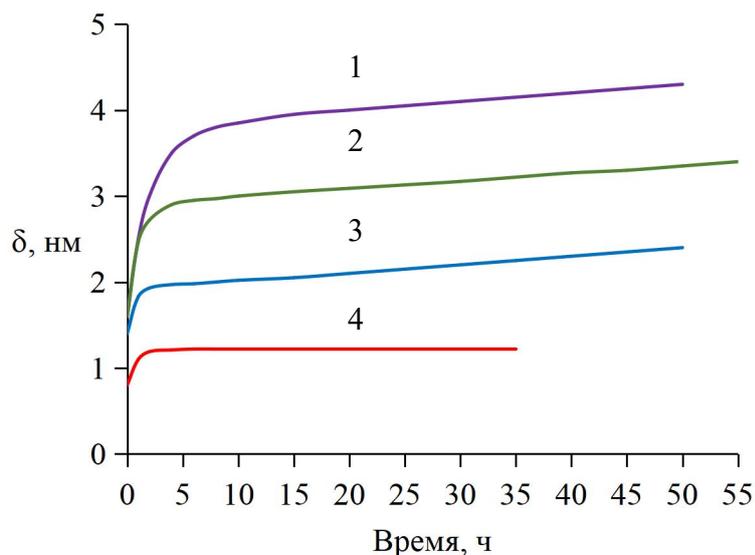


Рис. 2.9. Толщина оксидных пленок, образующихся на поверхности различных металлов при комнатной температуре [16]:
1 – медь; 2 – железо; 3 – алюминий; 4 – серебро

Поверхностные пленки играют большую роль при трении. Основное влияние их на процессы трения заключается в том, что они препятствуют образованию прочных металлических связей, заменяя их гораздо более слабыми ван-дер-ваальсовыми.

Поскольку на поверхности любого твердого тела практически всегда находятся различного рода пленки, состав и свойства которых зависят от внешних условий, следует осторожно относиться к приводимым в справочниках «универсальным» значениям коэффициента трения.

Поверхностные пленки могут разрушаться при трении или пластической деформации, обнажая чистую поверхность металлов. Разрушению пленок способствует то обстоятельство, что образующиеся защитные пленки оказываются в напряженном (сжатом) состоянии, если объем окисла больше объема металла, и легко растрескиваются; кроме того, твердость окислов, как правило, больше твердости металлов. Наконец, если скорость окисления меньше скорости истирания пленки, то не успевающая нарастать при трении пленка не изолирует трущиеся поверхности.

2.5. Механические свойства материала поверхностного слоя

Наиболее важными для процессов трения механическими свойствами поверхностных слоев являются твердость (микротвердость), модуль упругости при растяжении (сжатии) E и предел прочности материала при сдвиге. От твердости и модуля упругости зависит величина площади касания контактирующих тел при пластическом и упругом контакте соответственно (см. гл. 4, 5), от предела прочности материала при сдвиге – величина удельной силы трения (см. гл. 6). Упругие свойства материала в поверхностных слоях отличаются от объемных незначительно, но пластические свойства, в том числе твердость, существенно изменяются по глубине.

Существует несколько стандартных методов измерения твердости материалов и соответственно несколько количественных характеристик твердости, наиболее распространенные из них – по Бринеллю, по Виккерсу, по Роквеллу. Строгий физический смысл имеет только так называемая твердость индентирования H_{IT} (ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002)), известная также как твердость по Мейеру. Твердость индентирования определяется как отношение нагрузки на индентор к площади поперечного сечения контактной поверхности между индентором и испытуемым образцом и представляет собой не что иное, как среднее нормальное напряжение в контакте индентора с материалом образца.

Значения твердости индентирования близки к значениям твердости по Виккерсу, которая определяется как отношение нагрузки на индентор (четырёхгранную алмазную пирамиду с углом 136° между противоположными гранями) к площади поверхности полученного пирамидального отпечатка. Для пирамидального индентора Виккерса отношение площади поперечного сечения A_p к площади поверхности A_s постоянно на любом расстоянии от вершины: $\frac{A_p}{A_s} = 0,927$. Соответственно, для величин твердости индентирования H_{IT} и твердости по Виккерсу HV , выраженных в одинаковых единицах, справедливо соотношение $HV = 0,927 H_{IT}$, т.е. твердость по Виккерсу отличается от твердости индентирования менее чем на 8 %. Если учесть, что стандартное число твердости по Виккерсу HV выражается в технической системе единиц (единица измерения – килограмм-сила на квадратный миллиметр), то $HV = 0,0945 H_{IT}$, где величина H_{IT} выражена в мегапаскалях (МПа).

Аналогичная корреляция твердости индентирования с твердостью по Бринеллю невозможна, так как в способе Бринелля не обеспечивается геометрическое подобие отпечатка при различных нагрузках на индентор.

ГОСТ Р 8.748-2011 охватывает три диапазона применения метода индентирования для определения твердости: макро-, микро- и нанодиапазон. Диапазоны отличаются величинами нагрузок на инденторы F и глубиной их внедрения h (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Диапазоны применения метода индентирования по ГОСТ Р 8.748-2011

Макродиапазон (твердость)	Микродиапазон (микротвердость)	Нанодиапазон (нанотвердость)
$2\text{Н} \leq F \leq 30 \text{ кН}$	$F < 2\text{Н} (200 \text{ гс}); h > 0,2 \text{ мкм}$	$h < 0,2 \text{ мкм}$

Микротвердость характеризует механические свойства поверхностных слоев материала и нормируется ГОСТ 9450-76 с изменениями от 1981 и 1991 годов. Для измерения микротвердости используются инденторы различной формы, при этом нагрузка на индентор не превосходит 4,9 Н (500 гс), а глубина внедрения – не более нескольких десятков микрометров.

Для измерения нанотвердости существуют специальные нанотвердомеры [17, 18], измерение нанотвердости возможно также с помощью атомного силового микроскопа.

Современные твердомеры позволяют, помимо непосредственно твердости, определять ряд других механических характеристик поверхностного слоя, таких как модуль упругости E , работа пластической и упругой деформации, коэффициент упругого восстановления и др. [17, 18]. Необходимую для этого информацию получают на основании диаграммы вдавливания – зависимости нагрузки на индентор от глубины его внедрения в материал при нагружении и разгрузке контакта – построение которой осуществляется твердомером.

Масштабный фактор играет большую роль в определении твердости. Для примера в табл. 2.5 приведены величины микро- и нанотвердости различных металлов по данным авторов и на основании работы [19]. Микротвердость определена по ГОСТ 9450-76 с помощью алмазной четырехгранной пирамиды с последующим пересчетом значений в гигапаскалях, нанотвердость – методом склерометрии при глубине внедрения индентора не более 200 нм.

Таблица 2.5. Твердость металлов, ГПа, на различных масштабных уровнях

Металл	Микротвердость	Нанотвердость
Золото Зл99,99	0,47	2,52
Серебро Ср99,99	1,13	4,14
Цирконий иодидный 99,99 %	1,63	3,80
Молибден [19]	2,6	3,6
Вольфрам [19]	6,0	6,5
Титан [19]	2,9	4,3

Механические свойства материалов в той или иной степени зависят от температуры. При этом величины характеристик упругих свойств металлов (модули упругости E и G) незначительно и практически линейно уменьшаются с ростом температуры. Наименее подвержен влиянию температуры модуль упругости тугоплавких металлов. Например, при

изменении температуры от комнатной до +500 °С модуль упругости железа уменьшается примерно на 13 %, меди – на 15 %, вольфрама – на 4 %. В среднем при повышении температуры на 100 градусов модуль упругости E уменьшается на 2–4 %. Такими изменениями во многих случаях можно пренебречь. Необходимо только иметь в виду, что в точках фазового перехода модуль упругости меняется скачком.

Твердость металлов гораздо в большей степени зависит от температуры. Для описания этой зависимости рекомендуется формула [20]

$$H(\Theta) = H_0 \frac{1 - \Theta^{\frac{2}{3}}}{1 - \Theta_0^{\frac{2}{3}}}, \quad (2.8)$$

где H_0 – твердость материала при нормальных лабораторных условиях измерения; $\Theta_0 = T_0/T_{пл}$ – гомологическая температура, при которой измерена твердость H_0 . $H(\Theta)$ – твердость при любой другой температуре $\Theta = T/T_{пл}$, как большей Θ_0 , так и меньшей.

На рис. 2.10 представлено сравнение теоретических (см. уравнение (2.8)) и экспериментальных температурных зависимостей твердости 17 металлов: меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов, железа и малоуглеродистых сталей, чистых металлов Ag, Pb, Zn, Mo. Экспериментально подтверждено, что уравнение (2.8) адекватно описывает температурную зависимость твердости металлов в широком температурном диапазоне.

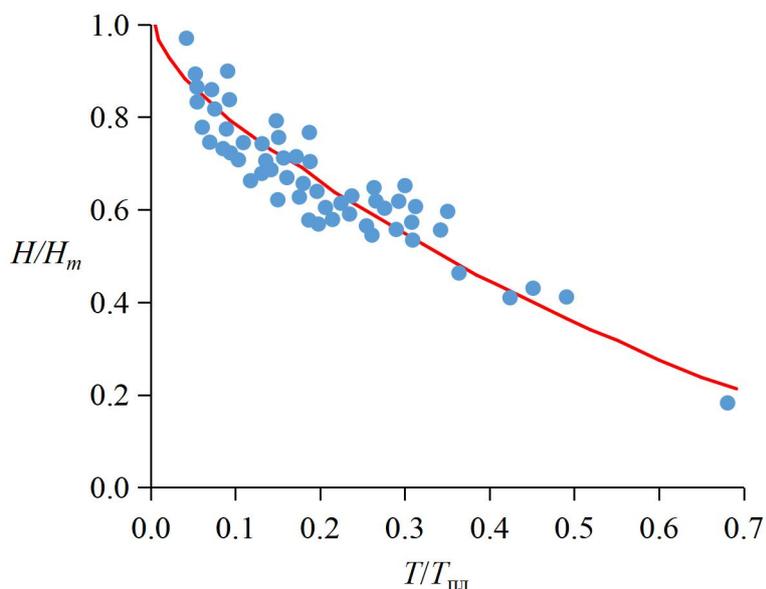


Рис. 2.10. Температурная зависимость твердости металлов:
 точки – экспериментальные результаты;
 линия – теоретическая зависимость по уравнению (2.8); $H_m = \frac{H_0}{1 - \Theta_0^{\frac{2}{3}}}$

Уравнению (2.8) можно придать несколько иной вид, записав его в абсолютных величинах:

$$H(T) = H_0 \frac{T_{пл}^{\frac{2}{3}} - T^{\frac{2}{3}}}{T_{пл}^{\frac{2}{3}} - T_0^{\frac{2}{3}}}$$

Достоинство данной зависимости по сравнению с многочисленными аналогичными в ее универсальности и отсутствии эмпирических коэффициентов.

2.6. Влияние механической обработки и трения на свойства поверхностного слоя

Поверхности деталей машин и механизмов первоначально получают механической обработкой: точением, шлифованием, фрезерованием, полированием и т.п. Воздействие режущего инструмента (резца, фрезы, абразивного зерна) на обрабатываемую деталь сводится к пластической деформации и разрушению материала. Поэтому в результате любой технологической операции по обработке поверхности происходит изменение структуры и свойств поверхностного слоя по сравнению со свойствами недеформированного материала. Значительная пластическая деформация приводит к увеличению концентрации дефектов кристаллического строения в поверхностном слое и, как следствие, к его упрочнению.

Ориентировочные значения глубины упрочненного слоя и степени упрочнения при некоторых видах механической обработки приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Упрочнение материала при различных видах обработки

Обработка	Степень упрочнения $H_{пов}/H_{об}$	Толщина упрочненного слоя, мкм
Точение	1,2–2,0	30–200
Фрезерование	1,4–2,0	40–200
Сверление	1,6–1,7	180–200
Шлифование круглое	1,25–2,5	20–60
Шлифование плоское	1,5	15–35
Протягивание	1,5–2	20–75
Притирка	1,1–1,2	3–7

Примечание. $H_{пов}$ и $H_{об}$ – величины твердости материала в поверхностном слое (микротвердость) и в объеме.

При использовании специальных методов упрочнения поверхности, таких как химико-термическая обработка, обработка концентрированными потоками энергии, поверхностное пластическое деформирование, толщина упрочненного слоя может достигать нескольких миллиметров.

Однако самые верхние слои металла в процессе трения могут, наоборот, разупрочняться, причем их структура приближается к аморфной (см. рис. 2.1). Такой слой, толщиной около 5 нм, часто называют слоем Бейлби. Он образуется, в частности, при полировании.

Примеры экспериментально полученных зависимостей микротвердости H от глубины h для моно- и поликристаллических образцов из различных материалов приведены на рис. 2.11.

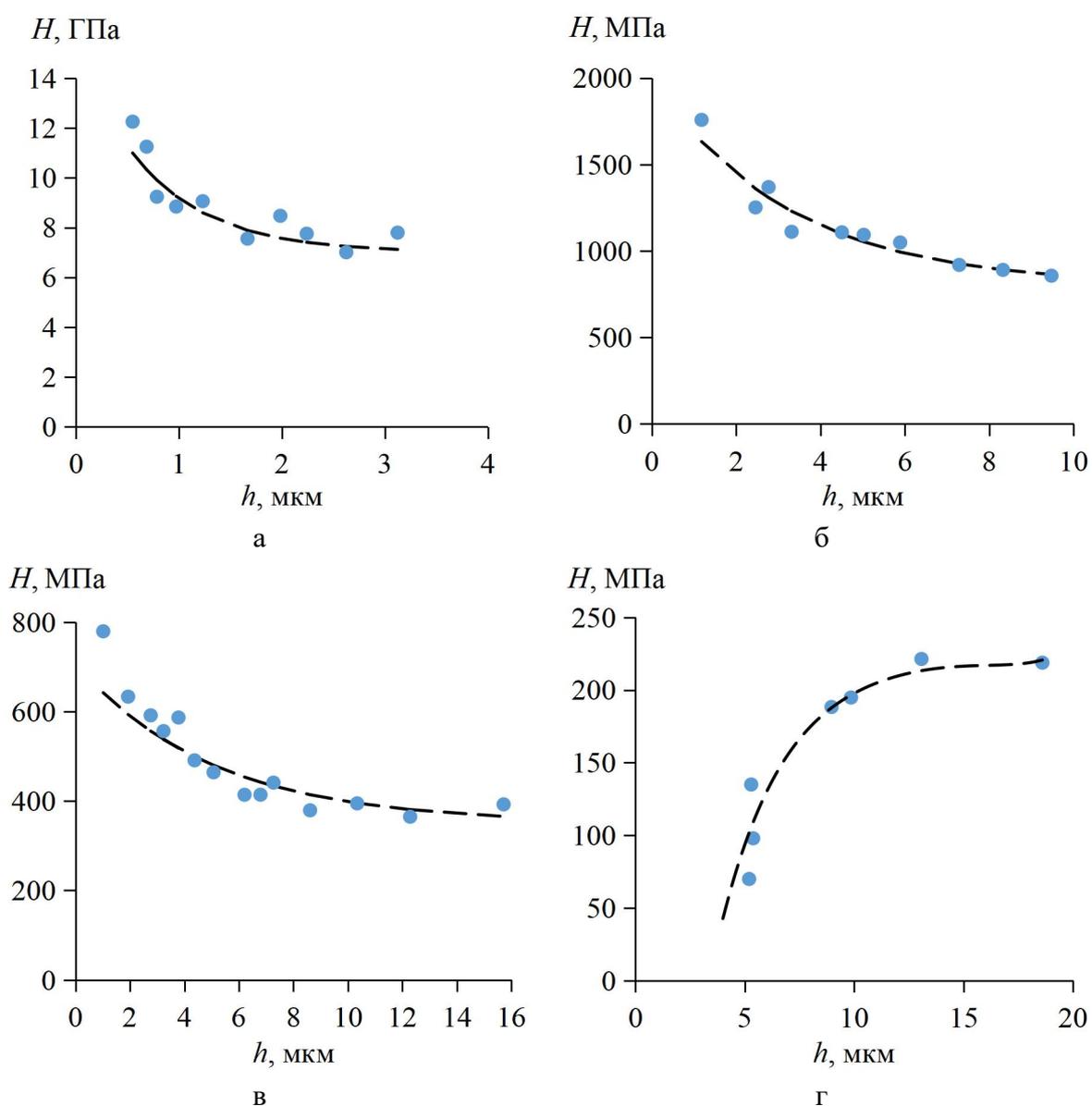


Рис. 2.11. Зависимость микротвердости H от глубины h :
а – монокристалл Ge; б – Cu; в – Al (поликристаллы) [21]; г – Cd [22];
точки – экспериментальные значения; линии – расчет по формуле (2.9)

Зависимости, представленные на рис. 2.11, можно описать уравнением

$$H = H_0 + (H_s - H_0)e^{-\frac{h}{h_m}}, \quad (2.9)$$

где параметр h_m характеризует толщину упрочненного (разупрочненного) слоя; H_0 – твердость материала вдали от поверхности; H_s – твердость материала в слое, непосредственно прилегающем к поверхности. Как видно из рис. 2.11, уравнение (2.9) удовлетворительно описывает изменение микротвердости по глубине для различных материалов как при положительном, так и при отрицательном градиенте механических свойств.

2.7. Эффект Ребиндера

Эффектом Ребиндера (эффектом адсорбционного понижения прочности) называют разупрочнение тонких приповерхностных слоев твердых тел (толщиной $\sim 0,1$ мкм) под действием ПАВ. Поверхностно-активными называются вещества, способные адсорбироваться на поверхности твердого тела и уменьшающие его поверхностную энергию. В роли ПАВ могут выступать органические вещества – компоненты смазочных материалов (жирные кислоты, спирты, мыла и т.п.). Молекулы ПАВ образуют ориентированный слой на поверхности твердого тела, обеспечивая тем самым смазочное действие. Кроме того, ПАВ облегчают пластическую деформацию материала, снижая предел текучести материала, способствуют росту трещин за счет расклинивающего действия, а также уменьшают работу образования новых поверхностей.

Эффект Ребиндера способствует выполнению правила положительного градиента механических свойств: $\frac{dH_\mu}{dh} > 0$ – необходимое условие внешнего трения (рис. 2.12). Механические свойства могут характеризоваться микротвердостью, пределом текучести при растяжении и при сдвиге, пределом прочности. При положительном градиенте механических свойств процессы изнашивания ограничиваются тонким поверхностным слоем, тогда как при отрицательном градиенте разрушение материала в процессе трения происходит в глубине, возникают схватывание, заедание, глубинное вырывание.

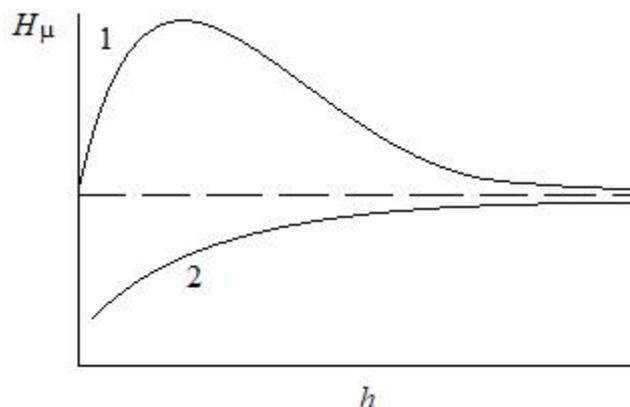


Рис. 2.12. Положительный градиент механических свойств поверхностных слоев материалов пары трения [23]: 1 – после технологической обработки; 2 – в процессе эксплуатации; H_{μ} – микротвердость; h – расстояние от поверхности

2.8. Физические методы исследования поверхности и поверхностных слоев твердого тела

Потребности современных технологий и науки привели к созданию многочисленных методик и соответствующего аппаратного и метрологического обеспечения для исследования, контроля и инженерии поверхностей твердых тел. Эти методики основаны на фундаментальных физических принципах. Многие методики известны давно, другие появились сравнительно недавно, на рубеже XX и XXI веков. В зависимости от физических принципов, на которых базируются конкретные методы, они различаются масштабным фактором и, как следствие, объектами исследования. Так, оптическая микроскопия ограничена размерами объектов порядка длины волны видимого света, т.е. ~ 1 мкм, тогда как сканирующая и атомная силовая микроскопия имеют разрешающую способность порядка размеров отдельных атомов (рис. 2.13).

Условно большинство методов исследования поверхности можно разделить на методы качественного и количественного анализа химического состава поверхностных слоев и методы анализа элементов структуры поверхности на различных масштабных уровнях вплоть до атомарного. Ниже кратко рассмотрены физические основы некоторых методов исследования поверхности твердых тел.

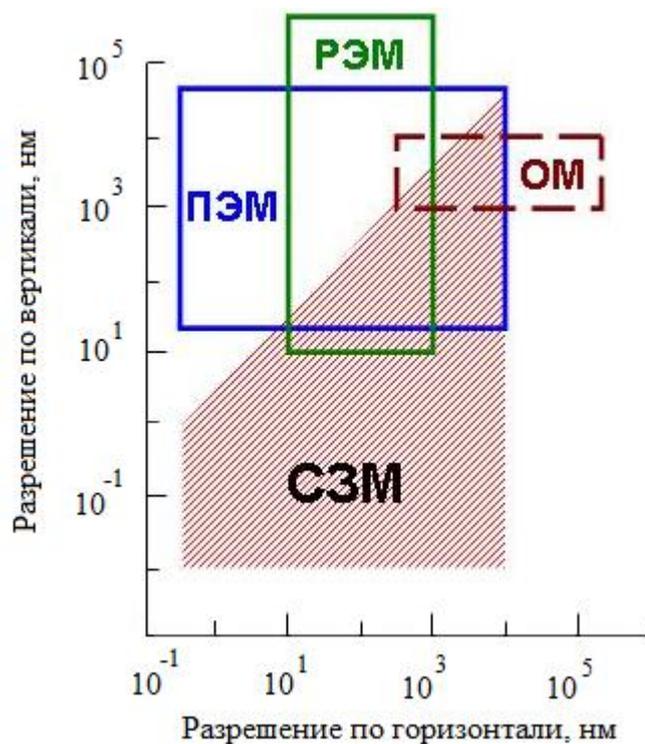


Рис. 2.13. Сравнение разрешающих способностей различных микроскопических методов исследования поверхности [24]:
 ОМ – оптическая микроскопия; РЭМ – растровая электронная микроскопия;
 ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;
 СЗМ – сканирующая зондовая микроскопия (СТМ и АСМ)

2.8.1. Оптическая микроскопия

Наиболее распространенным оптическим методом исследования поверхности является обычная оптическая микроскопия поверхностей. Используя металлографические микроскопы, производят металлографический анализ поверхностей для определения фазового состава, количественного содержания фаз, формы и размеров структурных составляющих. С помощью оптической микроскопии определяют также дефекты кристаллического строения, плотность дислокаций, микро топографию поверхности, размеры и форму частиц износа при трении. Оптическая микроскопия, как отмечалось выше, ограничена разрешением порядка долей микрометра и обеспечивает увеличение порядка $\times 1\,000$.

2.8.2. Эллипсометрия

К оптическим методам исследования поверхности можно отнести эллипсометрию. Метод эллипсометрии позволяет исследовать те свойства поверхности твердого тела, которые влияют на отражение электромагнитной (световой) волны. Источником информации о поверхности твердого тела служит отраженная эллиптически поляризованная электромагнитная волна (отсюда название метода) [25, 26]. Характеристиками эллиптической поляризации отраженной волны являются эллиптичность $\gamma = \pm \arctg\left(\frac{a}{b}\right)$ и азимут θ – направление большой оси эллипса относительно выбранного направления, например оси X (рис. 2.14).

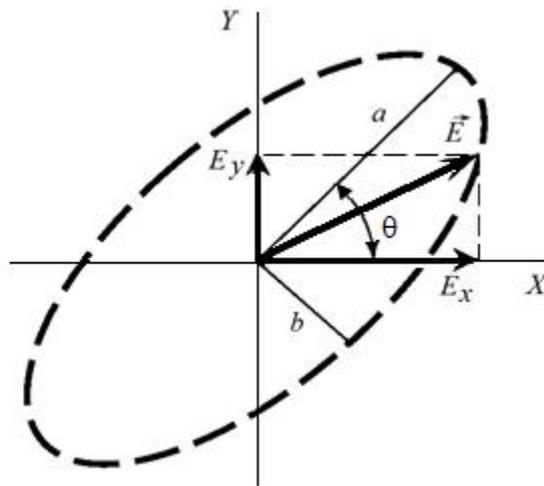


Рис. 2.14. Эллипс поляризации отраженной электромагнитной волны:
 \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; a, b – полуоси эллипса

Плоскую световую волну можно условно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие (рис. 2.14). Представим себе, что на исследуемую поверхность направляют плоскополяризованную световую волну, плоскость поляризации которой составляет 45° с плоскостью падения света. В этом случае в падающем луче две компоненты вектора напряженности электрического поля – лежащая в плоскости падения E_p и перпендикулярная ей E_s – имеют равные амплитуды. Разумеется, колебания в них совпадают по фазе.

Если на поверхности имеется тонкая пленка, то в отраженной волне компоненты вектора напряженности E_p и E_s будут различаться по фазе и амплитуде. В отраженной волне p - и s -составляющие амплитуды пропорциональны соответствующим составляющим падающей волны: $E_{1p} = R_p E_{0p}$; $E_{1s} = R_s E_{0s}$, где R_p и R_s – коэффициенты отражения, индекс 0 относится к падающей волне, а индекс 1 – к отраженной.

В эллипсометрии разность фаз p - и s -составляющих отраженной электромагнитной волны обозначают Δ , а соотношение амплитуд отраженной и падающей волн характеризуют параметром $\psi = \text{arctg} \frac{R_p}{R_s}$.

Величины Δ , ψ , γ и θ , характеризующие эллиптическую поляризацию отраженной волны, зависят в том числе от толщины поверхностного слоя, которую, следовательно, можно рассчитать по экспериментально определенным значениям указанных характеристик эллиптической поляризации [26]. Метод обладает высокой чувствительностью и позволяет обнаружить даже поверхностные слои, составляющие долю монослоя [25].

2.8.3. Методы исследования состава и структуры поверхности на атомарном уровне

Методов исследования химического состава и атомарной структуры поверхности насчитывается не один десяток [24]. Возможности некоторых из них приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Возможности физических методов исследования поверхности твердого тела [24]

Метод	Атомная структура	Элементный состав
ДМЭ, ПЭМ, РЭМ,	+	–
СТМ, АСМ	+	–
ОЭС	–	+
РФЭС	–	+

Примечание. ДМЭ (*LEED*) – дифракция медленных электронов; ПЭМ (*TEM*) и РЭМ (*SEM*) – просвечивающая и растровая электронные микроскопии соответственно; СТМ (*STM*) и АСМ (*AFM*) – сканирующая туннельная и атомная силовая микроскопии соответственно; ОЭС (*AES*) – оже-электронная спектроскопия; РФЭС (*XPS*) – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (в скобках приведены международные обозначения методов).

2.8.3.1. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Метод основан на явлении фотоэффекта, т.е. на поглощении веществом рентгеновского излучения с последующей эмиссией фотоэлектронов. Детектор регистрирует кинетическую энергию испускаемых электронов, по которой затем определяется их энергия связи в исследуемом веществе.

Каждый химический элемент имеет свои характерные значения энергии связи для внутренних электронных уровней, поэтому спектр

вылетевших электронов отражает элементный состав вещества (кроме водорода и гелия).

Любой химический элемент дает одну или более спектральных линий. Линия с максимальной интенсивностью называется основной и обычно используется для идентификации элемента в спектре. По интенсивности спектральных линий возможен количественный анализ химического состава поверхностных слоев.

Выбитые рентгеновскими квантами электроны сильно поглощаются исследуемым веществом, поэтому достичь поверхности и быть зарегистрированными могут только электроны с самых верхних слоев образца толщиной несколько нанометров.

2.8.3.2. Оже-электронная спектроскопия

Метод ОЭС основан на регистрации энергии вторичных электронов, эмитированных твердым телом в результате бомбардировки его поверхности пучком первичных электронов.

Механизм оже-эффекта иллюстрируется рис. 2.15. Первичный электрон из бомбардирующего поверхность электронного пучка выбивает электрон с одной из внутренних оболочек атома (например, K). Образовавшуюся вакансию занимает электрон с одной из верхних оболочек. Выделившаяся при этом переходная энергия может быть излучена в виде рентгеновского кванта либо передана электрону с одной из верхних оболочек. Если этой энергии достаточно для того, чтобы электрон покинул кристалл, он регистрируется как оже-электрон. Поскольку оже-электроны обладают характерными для каждого химического элемента значениями энергии, по энергетическому спектру эмитируемых электронов можно сделать вывод о наличии в поверхностных слоях того или иного элемента.



Рис. 2.15. Схема электронных переходов при оже-эффекте [24]:
 $E_{\text{вак}}$ – энергетический уровень вакуума; K – номер оболочки атома

Возможность сканирования образца сфокусированным электронным пучком позволяет получить карту распределения элементов по поверхности образца, а в совокупности с послойным ионным травлением можно также получить трехмерную карту распределения элементов в поверхностных слоях образца, в том числе, например, определить толщину поверхностных оксидных или сульфидных пленок.

2.8.3.3. Зондовые методы

Методы сканирующей зондовой микроскопии позволяют получить изображение поверхности с атомным разрешением по всем трем координатам, т.е., без преувеличения, наблюдать отдельные атомы.

2.8.3.3.1. Сканирующая туннельная микроскопия

Действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннельном эффекте – преодолении электроном потенциального барьера, высота которого превышает энергию электрона. В данном случае электрон туннелирует через потенциальный барьер между проводящим зондом и поверхностью исследуемого образца. Сила тока туннелирующих электронов в значительной степени зависит от толщины барьера (в СТМ – от толщины зазора между зондом и поверхностью образца). Зонд СТМ представляет собой тонкую проводящую иглу с радиусом закругления острия ~ 10 нм. Перемещение зонда в трех взаимно перпендикулярных направлениях осуществляется пьезокерамическим приводом. Диапазон перемещения зонда в горизонтальной плоскости (x, y) составляет ~ 1 мкм с точностью $\sim 0,01$ нм; в вертикальном направлении z – ~ 1 мкм с точностью $\sim 0,001$ нм.

Сканирующий туннельный микроскоп может работать в двух режимах [27]. В первом (рис. 2.16а) при сканировании поверхности образца вертикальное положение зонда не изменяется, при этом туннельный ток изменяется в зависимости от расстояния между зондом и поверхностью, воспроизводя рельеф поверхности. Во втором режиме (рис. 2.16б) с помощью системы обратной связи при сканировании постоянно изменяется расстояние от вершины зонда до поверхности так, чтобы туннельный ток оставался постоянным. Регистрируя вертикальные перемещения зонда, можно получить профиль поверхности. Первый режим больше подходит для атомарно гладких поверхностей, второй – для нерегулярных поверхностей, так как в этом режиме меньше вероятность соприкосновения зонда с поверхностью.

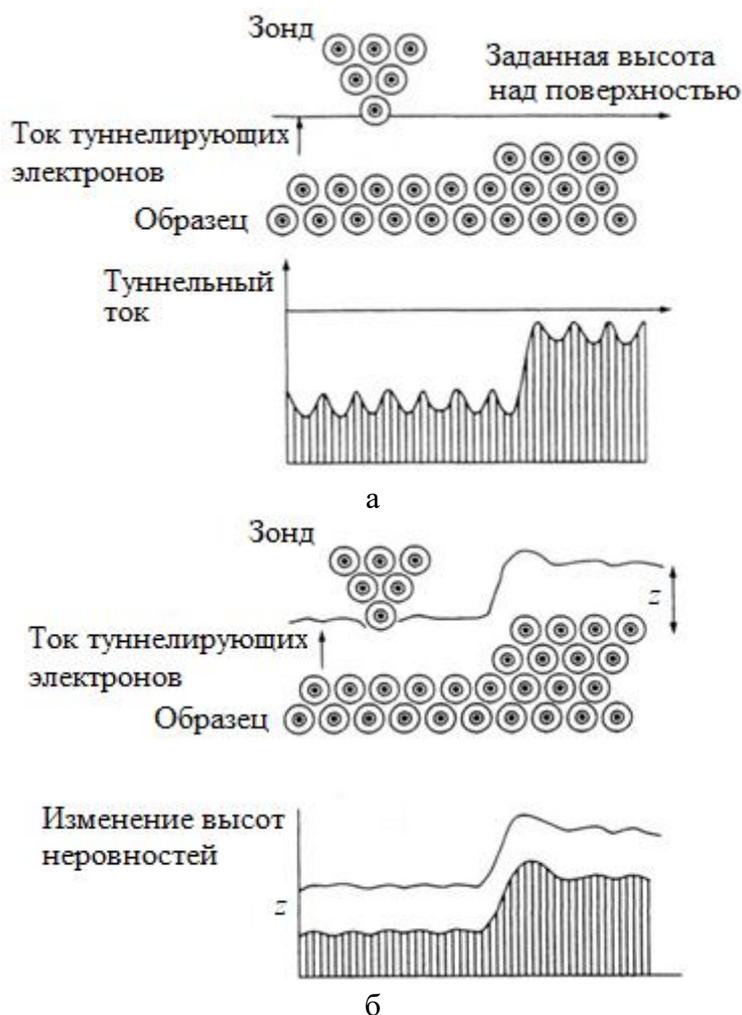


Рис. 2.16. Схемы работы СТМ при сканировании поверхности [27]:
а – режим постоянной высоты; б – режим постоянного туннельного тока

Очевидно, что исследуемый образец должен быть токопроводящим. Для исследования поверхности диэлектрика на нее напыляют тонкую металлическую пленку.

2.8.3.3.2. Атомная силовая микроскопия

Еще одной разновидностью зондового метода исследования поверхности твердого тела является АСМ. Принцип работы атомного силового микроскопа заключается в регистрации силы взаимодействия атомов зонда и исследуемого образца.

Схема атомного силового микроскопа приведена на рис. 2.17 [28]. Зонд закреплен на тонкой упругой консоли (кантилере). Силы межатомного взаимодействия между зондом и образцом (притяжение или отталкивание) вызывают упругую деформацию кантилевера.

Наиболее распространенный метод детектирования деформации кантилевера под действием межатомных сил показан на рис. 2.17. Деформация кантилевера измеряется с помощью лазерного датчика

отклонения. Лазерный луч отражается от тыльной зеркальной поверхности кантилевера и попадает на четырехсегментный фотодиод. В исходном состоянии (кантилевер не деформирован) ток на каждом из четырех сегментов фотодиода одинаков. При сканировании поверхности взаимодействие зонда с поверхностью образца заставляет кантилевер изгибаться, вызывая изменение направления отраженного лазерного луча и соответствующее изменение тока в каждом из сегментов фотодиода. Четырехсегментный фотодиод позволяет регистрировать не только вертикальные силы, действующие на зонд перпендикулярно поверхности, но также и горизонтальные (латеральные) силы, направленные вдоль нее.

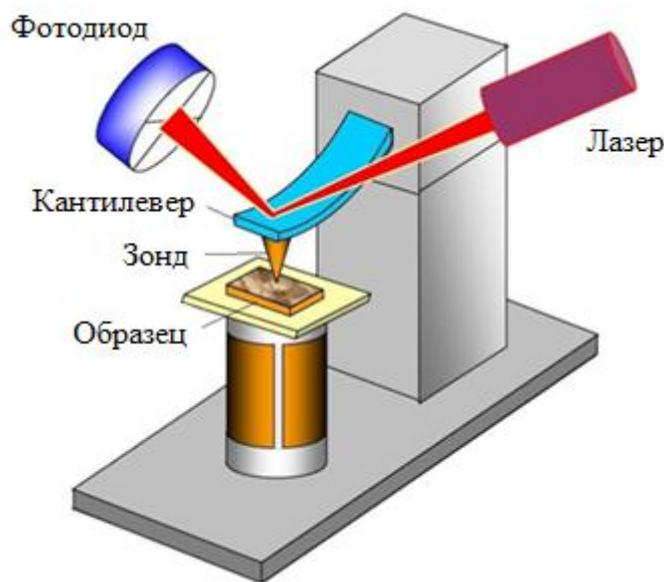


Рис. 2.17. Схема атомного силового микроскопа [28]

Изображение поверхности может быть получено в одном из двух режимов: постоянной высоты зонда или постоянной силы. Эти режимы являются аналогами топографического и токового режимов СТМ.

Кроме этих режимов, позволяющих изучать нанотопографию поверхности, АСМ может работать в режиме наноиндентирования для измерения твердости на наномасштабном уровне. В принципе методика наноиндентирования аналогична стандартному методу определения твердости макроскопических материалов: зонд вдавливается в образец, а затем глубину и форму образовавшегося отпечатка измеряют в обычном режиме АСМ. Возможно измерение нанотвердости методом склерометрии (царапания индентором), при котором величина твердости при известной нагрузке на индентор определяется по ширине царапины.

2.8.4. Другие методы

2.8.4.1. Просвечивающая и растровая электронная микроскопия

Электронная микроскопия применяется для изучения микрогеометрических характеристик поверхности, кристаллографии, дефектов структуры. Метод основан на том, что электроны, ускоренные напряжением U , обладают волновыми свойствами с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}, \quad (2.10)$$

где h – постоянная Планка; m и e – масса и заряд электрона соответственно. Так, электроны, ускоренные разностью потенциалов порядка 50 кВ, обладают свойствами волны с длиной $\lambda \sim 5 \cdot 10^{-12}$ м, что в 100 000 раз меньше длины световой волны.

Благодаря малой величине длины волны электронов обеспечивается высокая разрешающая способность. Изображение можно получить в проходящих лучах (ПЭМ) и в отраженных (РЭМ).

Просвечивающие электронные микроскопы позволяют получить разрешение до 1 нм, т.е. распознать объекты молекулярного порядка. Основной недостаток ПЭМ – необходимость снимать тонкие, прозрачные для электронов реплики-отпечатки с исследуемой поверхности.

Для исследования поверхностей твердых тел более удобны отражательные электронные микроскопы. Изображение в таком микроскопе получается вследствие разного рассеяния электронов различными участками поверхности в зависимости от материала и микрорельефа. Обычно отражательные электронные микроскопы работают по принципу сканирования исследуемой поверхности электронным лучом, имеющим развертку по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Электронный луч перемещается по исследуемой поверхности вдоль близко расположенных параллельных линий (растр), поэтому такие электронные микроскопы называются растровыми. Коллектор электронов фиксирует вторичные электроны и рассеянные первичные электроны из электронного луча (упруго- и неупругорассеянные) [29]. Вторичные электроны – это электроны анализируемого материала, которые смогли преодолеть потенциальный барьер на границе твердое тело – вакуум (совершить работу выхода). Коэффициент вторичной эмиссии δ равен отношению числа вторичных электронов к числу первичных и меняется в широких пределах в зависимости от энергии первичных электронов. Аналогично рассчитываются коэффициенты эмиссии упруго- и неупругорассеянных электронов η и ω . Полный коэффициент электронной эмиссии $\sigma = \delta + \eta + \omega$. Отраженный от данного участка поверхности сигнал усиливается и передается на экран монитора. Увеличение РЭМ

определяется как отношение размера элемента поверхности на экране монитора к истинному размеру этого элемента на поверхности.

Разрешающая способность РЭМ порядка 5–10 нм, увеличение до $\times 100\,000$.

Основное преимущество электронных микроскопов по сравнению с оптическими заключается в сочетании большого увеличения (до $\times 100\,000$ у РЭМ и $\times 500\,000$ у ПЭМ) с большой глубиной резкости (порядка единиц и десятков микрон). Это позволяет одновременно наблюдать при большом увеличении детали поверхности, находящиеся на разных высотах, и получить наглядное объемное изображение структуры поверхности.

2.8.4.2. Дифракция медленных электронов

Проникающая способность электронов с энергией менее 500 эВ (отсюда название метода) составляет всего несколько атомных слоев, поэтому дифракционная картина дает информацию о структуре поверхностной кристаллической решетки. Метод основан на изучении дифракционной картины, возникающей в результате рассеяния электронов атомами кристаллической решетки. Дифракция электронов как проявление его волновых свойств впервые наблюдалась в известном опыте К. Дэвиссона и Л. Джермера. Длина волны электрона определяется формулой (2.10). Метод ДМЭ применяется в основном для исследования структуры поверхности, например для определения периода кристаллической решетки. Для примера на рис. 2.18 показана схема дифракции электронов на кристаллической решетке. Условие наблюдения дифракционных максимумов определяется известной формулой Вульфа – Бреггов:

$$\Delta = 2d\sin\Theta = m\lambda,$$

где Δ – разность хода электронных лучей, отраженных от соседних атомных плоскостей; d – межплоскостное расстояние; Θ – угол скольжения лучей; m – целое число; λ – длина электронной волны.

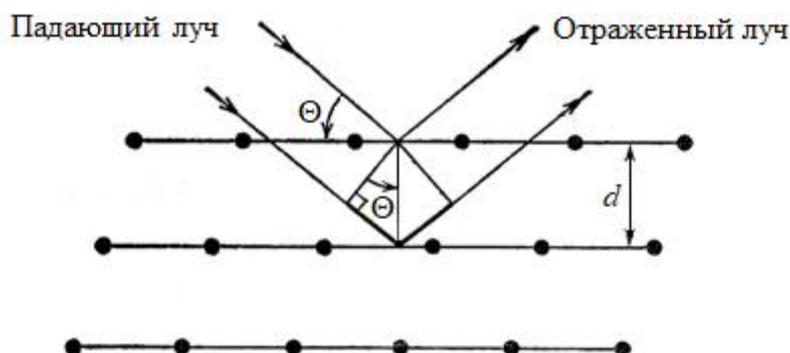


Рис. 2.18. Дифракция электронов на кристаллической решетке

Интерпретация результатов дифракции электронов зависит от характера наблюдаемой дифракционной картины [25]. Допустим, на некотором образце с атомарно чистой поверхностью наблюдается дифракционная картина, характерная для кристаллического состояния данного вещества. Адсорбция посторонних атомов на поверхности может: 1) не изменить дифракционную картину; 2) маскировать ее; 3) изменить параметры дифракционной картины, сохранив ее характерный вид. В первом случае либо адсорбция не происходит, либо электронный луч вызывает десорбцию, либо адсорбированное вещество образует периодическую структуру, идентичную структуре подложки (копирует ее). Во втором случае адсорбат образует на поверхности аморфный слой, в третьем – периодическую структуру с иными, чем у подложки, параметрами. Метод ДМЭ позволяет обнаружить изменения параметров кристаллической решетки порядка 5 % [25].

2.8.4.3. Дифракция рентгеновских лучей

Принципиально метод не отличается от предыдущего, только дифракцию испытывает не электронная, а электромагнитная волна. Однако высокая проникающая способность рентгеновских лучей не позволяет исследовать поверхностные слои. Для исследования поверхности более перспективным является метод скользящего рентгеновского пучка, предложенный Л.М. Рыбаковой. Благодаря очень малым углам скольжения рентгеновские лучи проникают на глубину не более нескольких атомных слоев.

2.8.4.4. Эмиссия электронов

Эмиссия электронов, т.е. испускание электронов поверхностью металла, может быть вызвана разными причинами. Различают термоэлектронную, фотоэлектронную, автоэлектронную эмиссию и т.д. Ускоряя эмитированные электроны и пропуская их через систему магнитных линз, можно получить изображение объекта, наглядно характеризующее распределение энергии электронов, в том числе и распределение работы выхода электронов по поверхности. Низкотемпературную эмиссию электронов различной природы объединяют термином «экзоэлектронная эмиссия», в противоположность высокотемпературной термоэлектронной эмиссии. Энергетический спектр экзоэлектронов включает в себе информацию о тех процессах, в результате которых электроны приобретают необходимую для эмиссии с поверхности энергию. Такими процессами являются деформация, разрушение, фазовые переходы и т.д.

2.8.4.5. Измерение работы выхода электронов

С точки зрения зонной теории твердых тел электроны в металле находятся в потенциальной яме, их энергия отрицательная (рис. 2.19). Максимальная энергия электронов в металле – энергия (уровень) Ферми. От этого уровня обычно отсчитывается работа выхода электронов (РВЭ) – энергия, которую должен получить электрон, чтобы покинуть металл и перейти в вакуум.

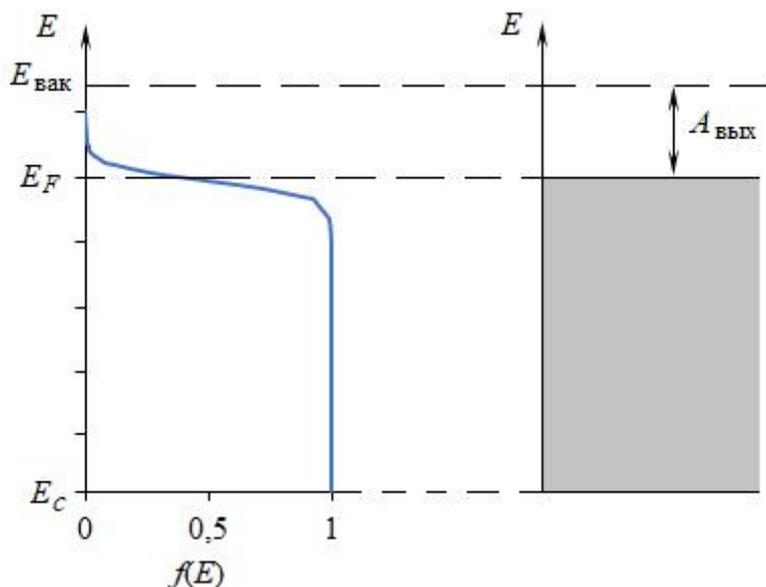


Рис. 2.19. Энергетическая диаграмма границы металла с вакуумом (справа) и функция распределения Ферми – Дирака (слева):
 $E_{\text{вак}}$ – энергетический уровень вакуума (энергия свободного электрона);
 E_F – уровень Ферми; E_C – энергия дна зоны проводимости; $A_{\text{вых}}$ – РВЭ

Работа выхода электронов очень чувствительна к наличию на поверхности металла адсорбированных атомов, оксидных, сульфидных, полимерных пленок, граничных слоев смазочных материалов, а также к изменению структуры и напряженного состояния металла.

Наибольшее распространение получил метод определения РВЭ с какой-либо поверхности по величине контактной разности потенциалов (КРП) между данной поверхностью и электродом сравнения (обычно из золота или платины).

Возникновение КРП поясняется рис. 2.20.

Если два разных металла сблизить до малого расстояния, на котором они могут обмениваться электронами (за счет туннельного эффекта, термоэлектронной эмиссии и т.п.), то уровни Ферми выравниваются, вследствие чего между металлами возникает внешняя КРП, равная разности работ выхода:

$$U_c = \frac{A_{\text{вых1}} - A_{\text{вых2}}}{e},$$

где e – заряд электрона. Если РВЭ для одного из металлов известна (электрод сравнения), то, измерив КРП, можно определить РВЭ второго металла.

Измерение внешней КРП обычно осуществляют так называемым методом динамического конденсатора (рис. 2.21) [25, 30].

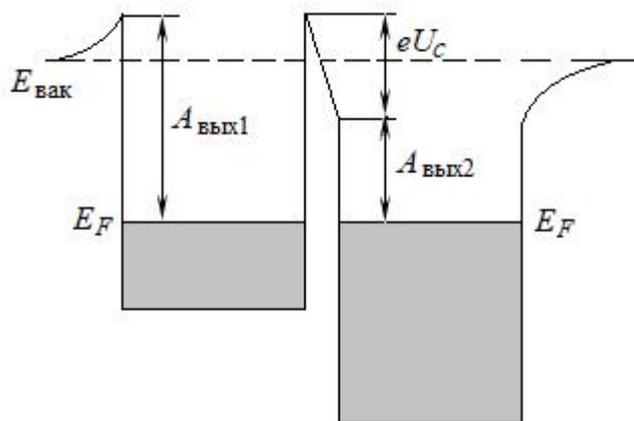


Рис. 2.20. Возникновение КРП

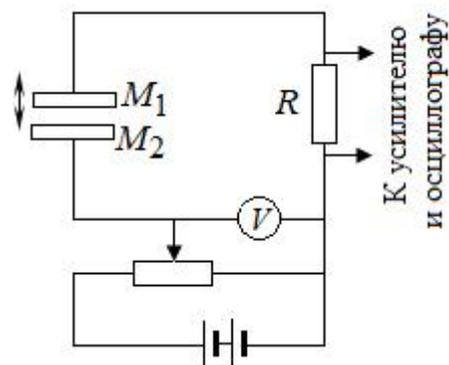


Рис. 2.21. Схема измерения КРП методом динамического конденсатора

Пластинки из исследуемых материалов M_1 и M_2 образуют плоский конденсатор, при этом одна из пластин совершает колебания с частотой несколько десятков герц и амплитудой несколько десятых долей миллиметра. На внутренней поверхности пластин появляются электрические заряды $q = CU_c$, где C – емкость конденсатора; U_c – контактная разность потенциалов. Так как емкость конденсатора изменяется с изменением расстояния между пластинами при колебании, в цепи появляется электрический ток $I = U_c \frac{dC}{dt}$, а на резисторе R – разность потенциалов $IR = RU_c \frac{dC}{dt}$. Контактную разность потенциалов можно скомпенсировать напряжением противоположного знака от батареи, при этом ток через резистор R прекратится, что можно зафиксировать, например, с помощью осциллографа. В этом случае вольтметр покажет величину контактной разности потенциалов.

Список литературы к главе 2

1. Владимиров Г.Г. Физика поверхности твердых тел: учебное пособие. СПб.: Лань, 2016. 352 с.
2. Смынтына В.А. Физико-химические явления на поверхности твердых тел: учебник. Одесса: Астропринт, 2008. 200 с.
3. Surface and Interface Science / ed. by K. Wandelt. Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co., 2012. 956 p.
4. Андреев Ю.Я., Терентьев А.В. Расчет поверхностной энергии металлов: согласование термодинамической вакансионной модели (TVM) с теорией первых принципов (DFT) // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т. 55. № 4. С. 339–345.
5. Андреев Ю.Я. Вакансионная термодинамическая модель поверхностной энергии твердых металлов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. Т. 48. № 1. С. 29–38.
6. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.
7. Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. Amsterdam e.a.: Academic Press, 2011. 674 p.
8. Rabinowicz E. Influence of Surface Energy on Friction and Wear Phenomena // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. № 8. P. 1440–1444.
9. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Металлургия, 1978. 176 с.
10. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 304 с.
11. Векман А.В. Энергия границ зерен наклона в металлах и сплавах с ГЦК решеткой // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 3. С. 96–100.
12. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в микроэлектронике. М.: Техносфера, 2014. 176 с.
13. Jacobs T.D.V. [et al.] The effect of atomic-scale roughness on the adhesion of nanoscale asperities: A combined simulation and experimental investigation // Tribology Letters. 2013. V. 50. P. 81–93.
14. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006. 160 с.
15. Физическое материаловедение. Т. 2. Основы материаловедения: учебник для вузов / под общ. ред. Б.А. Калина. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 604 с.
16. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов. М.: Металлургия, 1965. 428 с.

17. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2142.
18. Гоголинский К.В., Решетов В.Н., Усеинов А.С. Измерения твердости в субмикро- и нанометровом диапазонах линейных размеров // Мир измерений. 2010. № 8. С. 41–47.
19. Усеинов С.С. Измерение твердости конструкционных материалов методами индентирования и склерометрии на субмикронном и нанометровом масштабах: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. М., 2010. 27 с.
20. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 116 с.
21. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Характеристики изнашивания поверхностей с градиентом твердости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 7. С. 300–305.
22. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.
23. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
24. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: учебное пособие / В.И. Троян [и др.]. М.: МИФИ, 2008. 260 с.
25. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 488 с.
26. Мальцев В.Н. Учебно-методический комплекс дисциплины «Оптические методы исследования в материаловедении». URL: <http://hdl.handle.net/10995/1551> (дата обращения: 30.08.2023).
27. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы: научное издание. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.
28. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Н. Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 113 с.
29. Физическое материаловедение. Т. 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов: учебник для вузов / под общей ред. Б.А. Калина. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 800 с.
30. Сивухин Д.В. Общий курс физики: учебное пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. Т. 3. 565 с.

ГЛАВА 3. МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Поверхность твердого тела, в отличие от гладкой математической поверхности, всегда имеет рельеф. Во-первых, это естественный рельеф [1], образованный дискретностью расположения атомов и молекул, ступеньками роста кристалла, выходом дислокаций, гранями кристаллических зерен, островковыми пленками и т.п. Во-вторых, это технический рельеф, который формируется при технологической обработке поверхности, в результате изнашивания при трении, вследствие коррозии поверхности и т.д.

В научной литературе и нормативных документах наряду с термином «рельеф» в том же значении используются термины «топография», «структура», «текстура» поверхности. По сути, это слова-синонимы.

Топография технических поверхностей играет важную роль в протекании многих процессов, связанных с функционированием современных технических устройств. К таким процессам относятся трение, изнашивание, перенос энергии (механической, тепловой, электрической), адсорбция, отражение электромагнитных волн, утечка через уплотнения и др.

Специалисты насчитывают до двух десятков эксплуатационных свойств различных деталей и узлов, которые зависят от характеристик рельефа поверхностей деталей (от процессов трения и изнашивания, качества покраски и гигиенических свойств поверхности) [2–6].

Современные методы метрологии поверхностей можно разделить на три категории [7]: профильные, пространственные и интегральные.

Профильные методы позволяют получить случайную функцию (случайный процесс) $Z(X)$, пространственные – случайную функцию (случайное поле) $Z(X, Y)$ (рис. 3.1). Интегральные методы характеризуют рельеф поверхности по зависящим от него косвенным интегральным параметрам (например, по рассеянию света при отражении, электрической емкости и др.).

Пространственные (трехмерные) методы более объективно характеризуют поверхность, тем не менее профильные методы остаются широко распространенной категорией методов измерения параметров рельефа поверхности.

В Российской Федерации профильные характеристики рельефа поверхностей регламентируются тремя стандартами, действующими на момент написания данной монографии: ГОСТ 2789-73, ГОСТ 25142-82 и ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Первые два действуют в редакции 2017 года, которая в некоторых случаях существенно отличается от первоначальной, что необходимо иметь в виду при их использовании. Так, в новой редакции принципиально изменился смысл параметра Rz . ГОСТ Р ИСО 4287-2014, как видно из обозначения, гармонизирован с международным стандартом ISO 4287:1997. Он содержит наибольшее число параметров профиля, основные из которых рассмотрены ниже.

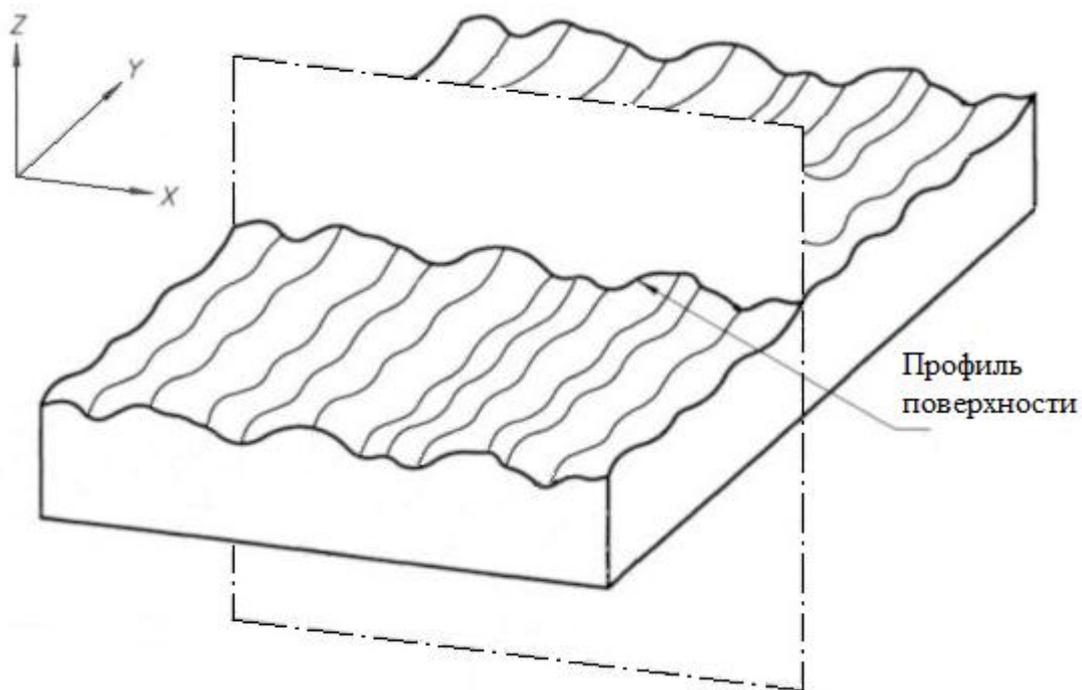


Рис. 3.1. Профиль поверхности и система координат по ГОСТ Р ИСО 4287-2014

3.1. Масштабные уровни рельефа поверхности

Традиционно в трибологии и механике контактного взаимодействия выделяют три уровня отклонений реальной поверхности от идеальной формы, заданной чертежом: макроотклонения, волнистость и шероховатость. В последнее время к ним добавился четвертый уровень – субшероховатость (наношероховатость).

Макроотклонения (конусность, бочкообразность, огранка и т.п.) обычно носят единичный характер и связаны с технологическими факторами – погрешностью установки, упругими деформациями детали и инструмента и т.п.

Волнистость в основном является следствием динамических процессов (колебаний) в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – деталь».

Шероховатость возникает в основном в результате воздействия обрабатывающего инструмента (резца, абразивного зерна и т.п.).

Критерием для разграничения перечисленных отклонений служит обычно соотношение высоты и шага неровностей: неровности с отношением шага к высоте больше 40 относят к волнистости, меньше 40 – к шероховатости. Очевидно, что такое разграничение носит условный характер. При этом ориентировочные величины шага волнистости и шероховатости лежат соответственно в интервале 0,8–10 мм и 2–800 мкм; ориентировочные величины высот волнистости и шероховатости – в диапазоне 0,03–500 мкм и 0,03–400 мкм.

Субшероховатостью принято называть неровности с высотой менее 25–30 нм: таковы минимальные значения высот неровностей, относящихся к микрошероховатости в большинстве национальных стандартов. Нижняя граница высоты неровностей субшероховатости составляет примерно 2 нм. При меньших масштабах могут нарушаться постулаты, лежащие в основе механики сплошных сред, в частности, гипотеза сплошности среды, соотношения между напряжениями и деформациями и т.д. Таким образом, диапазон значений высот неровностей субшероховатости занимает примерно один порядок величины, в отличие от значительно большего (четыре порядка величины) диапазона значений высот неровностей микрошероховатости.

В ГОСТ Р ИСО 4287-2014, как и в оригинале ISO 4287:1997, принцип классификации отклонений поверхности от идеальной формы иной. Ключевым понятием в этих документах является фильтрация профиля (рис. 3.2). Фильтры могут быть различными по принципу действия: цифровыми для числовой обработки сигнала, электрическими для аналогового сигнала и даже механическими. В зависимости от полосы пропускания фильтр выделяет элементы рельефа поверхности в соответствии с их масштабом (длиной волны) по оси X , направленной вдоль поверхности. Используются три фильтра: λ_s -фильтр разделяет шероховатость и более коротковолновые компоненты профиля; λ_c -фильтр разделяет шероховатость и волнистость; λ_f -фильтр разделяет волнистость и более длинноволновые компоненты профиля (рис. 3.2). Таким образом, длинноволновая часть спектра $\lambda_c \leq \lambda \leq \lambda_f$ соответствует волнистости, а коротковолновая $\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_c$ – шероховатости.



Рис. 3.2. Фильтрация профиля рельефа поверхности

Как видим, высоты неровностей при таком подходе не играют роли.

В результате фильтрации первичного профиля 1 (рис. 3.3) на выходе получают профиль волнистости 2 и профиль шероховатости 3. Понятие субшероховатости в ГОСТ Р ИСО 4287-2014 отсутствует.

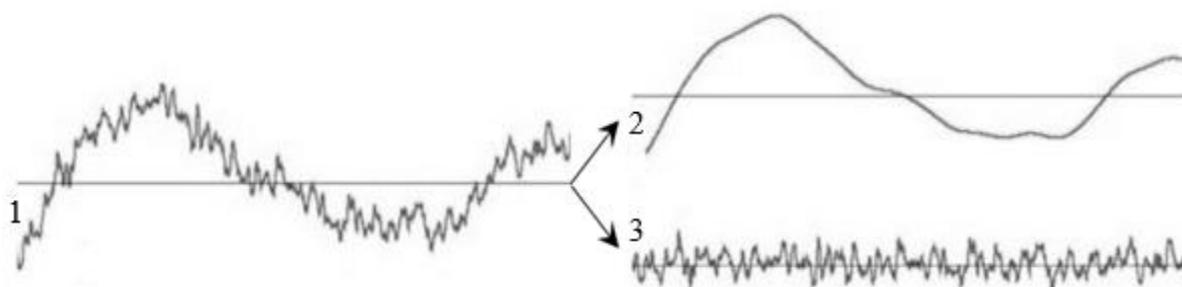


Рис. 3.3. Фильтрация профиля:

1 – первичный профиль; 2 – профиль волнистости; 3 – профиль шероховатости

3.2. Основные термины и определения ГОСТ Р ИСО 4287-2014

Прежде чем перейти к обсуждению конкретных терминов и параметров рельефа поверхности, необходимо сделать разъяснение редакционного характера.

Параметры, нормируемые перечисленными выше стандартами, обозначаются, как правило, двумя и более символами (Ra , RSm и т.п.). Такие обозначения неудобны для использования в математических выражениях, особенно в научных публикациях, так как составное обозначение из нескольких символов может ошибочно быть интерпретировано как произведение нескольких количественных величин. Эта проблема решена в российском стандарте ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, речь о котором пойдет далее (см. разд. 3.7). В данном нормативном документе за каждым термином следует его параметр (сокращенный термин), а затем его символ, состоящий из одной буквы с индексом (при необходимости), например Sq , S_q или $Smr(c)$, $S_{mr}(c)$.

Далее мы будем придерживаться такого же принципа: в тексте для обозначения параметра использовать сокращенный термин, а в уравнениях – соответствующий символ.

Средняя линия для первичного профиля – линия, определяемая путем подгонки линии номинальной формы по методу наименьших квадратов через первичный профиль. Среднеквадратичное отклонение профиля от этой линии минимально.

Средняя линия для профиля шероховатости – линия, которая соответствует длинноволновому компоненту профиля с подавлением при помощи фильтра профиля λ_c (см. рис. 3.3). Строится также по методу наименьших квадратов.

Средняя линия для профиля волнистости – линия, которая соответствует длинноволновому компоненту профиля с подавлением при помощи фильтра профиля λ_f (см. рис. 3.3). Строится также по методу наименьших квадратов.

Базовая длина – длина в направлении оси X , используемая для определения неоднородностей, характеризующих оцениваемый профиль. Базовая длина для профилей шероховатости l_r и волнистости l_w численно равна характерной длине волны фильтров профиля λ_c и λ_f соответственно. Базовая длина для первичного профиля l_p равна длине оценки.

Длина оценки l_n – длина в направлении оси X , используемая для оценки изучаемого профиля. Длина оценки может содержать одно или несколько значений базовых длин.

Стандарт ISO 4287 по умолчанию предусматривает длину оценки равной пяти базовым длинам (табл. 3.1). Этот же стандарт рекомендует значения базовой длины для непериодических профилей (например, шлифованных поверхностей) в зависимости от высотных параметров шероховатости. При выборе базовой длины также рекомендуется придерживаться требования: на ней должно присутствовать от 20 до 40 пересечений профиля средней линией [5]. Для волнистости такие рекомендации не приводятся.

Таблица 3.1. Рекомендуемые значения базовых длин по ISO 4287

Базовая длина l_r , мм	Диапазон параметров шероховатости, мкм	
0,08	$0,006 < Ra \leq 0,02$	$0,025 < Rz \leq 0,1$
0,25	$0,02 < Ra \leq 0,1$	$0,1 < Rz \leq 0,5$
0,8	$0,1 < Ra \leq 2$	$0,5 < Rz \leq 10$
2,5	$2 < Ra \leq 10$	$10 < Rz \leq 50$
8	$10 < Ra \leq 80$	$50 < Rz \leq 200$

3.3. Термины геометрических параметров

Геометрические параметры первичного профиля, профилей шероховатости и волнистости обозначаются соответствующими буквами.

R-параметр – параметр, рассчитываемый на основании первичного профиля.

R-параметр – параметр, рассчитываемый на основании профиля шероховатости.

W-параметр – параметр, рассчитываемый на основании профиля волнистости.

Например, параметр Ra рассчитывают для профиля шероховатости, а параметр Pt – для первичного профиля.

Пик профиля (выступ профиля в ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82) – направленная кнаружи (от материала к окружающей среде) часть оцениваемого профиля, соединяющая две соседние точки пересечения оцениваемого профиля с осью X (рис. 3.4).

Впадина профиля – направленная внутрь (от окружающей среды к материалу) часть оцениваемого профиля, соединяющая две соседние точки пересечения оцениваемого профиля с осью X (рис. 3.4).

Элемент профиля – пик профиля и прилегающая впадина профиля (рис. 3.4).

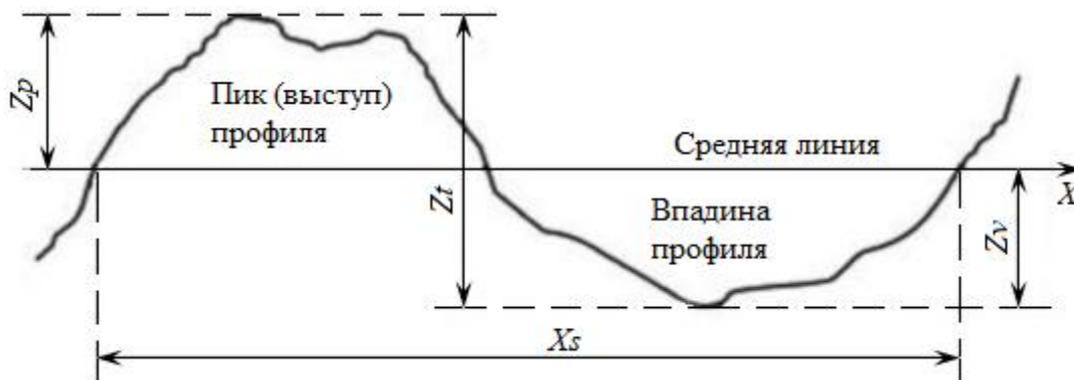


Рис. 3.4. Элемент профиля

3.3.1. Параметры амплитуды профиля

Максимальная высота пика (выступа) профиля P_p , R_p , W_p – максимальная высота пика профиля в пределах базовой длины (рис. 3.5).

Наибольшая глубина впадины профиля P_v , R_v , W_v – наибольшая глубина впадины профиля в пределах базовой длины (рис. 3.5).

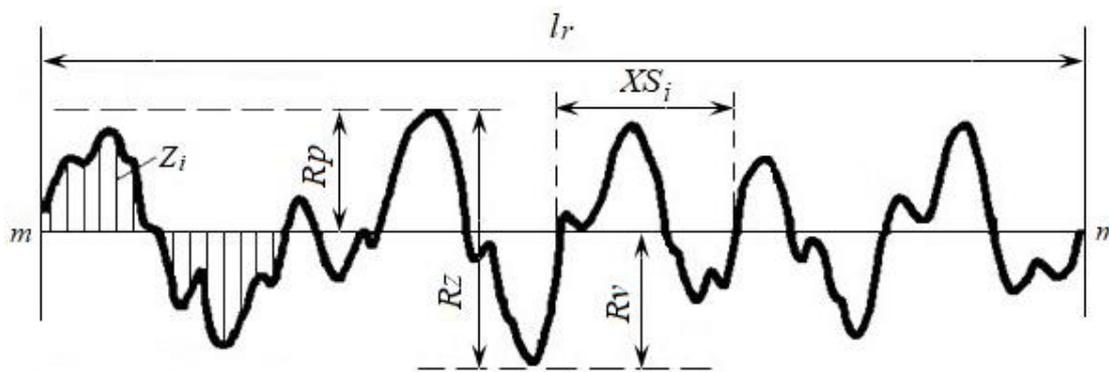


Рис. 3.5. Пример профиля шероховатости на базовой длине: mm – средняя линия

Максимальная высота профиля P_z , R_z , W_z – сумма максимальной высоты пика и наибольшей глубины впадины профиля в пределах базовой длины (см. рис. 3.5). В ранних редакциях ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 параметр R_z имел другой смысл и определялся как разность средних арифметических значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин (глубина впадины считается отрицательной).

В справочной и научной литературе имеется большой объем данных по значениям параметра Rz именно в такой трактовке. Некоторые приборы для измерения параметров профиля, которые продолжают эксплуатироваться, измеряют параметр Rz согласно его прежнему определению. Это обстоятельство следует иметь в виду во избежание неправильной трактовки параметра Rz .

Средняя высота элементов профиля P_c, R_c, W_c – среднее арифметическое значение высот элементов профиля в пределах базовой длины:

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i.$$

Параметр редко применяется на практике [7, 8].

Общая высота профиля Pt, Rt, Wt – сумма максимальной высоты пика профиля и наибольшей глубины впадины профиля *в пределах длины оценки*.

Поскольку значения параметров Pt, Rt, Wt определяются в пределах длины оценки, которая больше или равна базовой длине, для любого профиля будут выполняться соотношения:

$$Pt \geq Pz; Rt \geq Rz; Wt \geq Wz.$$

По умолчанию $Pt = Pz$, в этом случае рекомендуется использовать параметр Pt .

Арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля Pa, Ra, Wa – среднее арифметическое абсолютных значений ординат профиля $Z(x)$ в пределах базовой длины

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx,$$

где $l = lp, lr$ или lw – соответствующая базовая длина.

Если функция $Z(x)$ определена дискретным способом с определенным шагом дискретизации (см. рис. 3.5), расчетная формула будет иметь вид

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i|,$$

где N – число точек измерений координаты Z на базовой длине.

Параметр Ra – самый распространенный из всех параметров шероховатости поверхности. Параметр статистически очень стабилен, нетипичные случайные выступы или впадины мало влияют на его

величину. Параметр имеет надежное метрологическое обеспечение, т.е. может быть определен практически всеми приборами для профилометрии.

Среднеквадратичное отклонение профиля Pq, Rq, Wq – еще один статистически стабильный параметр, по смыслу близкий к предыдущему. Определяется по формуле

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx},$$

где $l = lp, lr$ или lw соответственно.

Параметры Ra и Rq сильно коррелированы. Для регулярной шероховатости, профиль которой близок к синусоиде, теоретическое значение $\frac{Rq}{Ra} = \pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11$. Для нормального (гауссовского) случайного профиля теоретическое значение $\frac{Rq}{Ra} = \sqrt{\pi/2} \approx 1,25$. Для микрошероховатости типичные значения $\frac{Rq}{Ra} = 1,20-1,35$. Для наношероховатости, которая по своей природе, безусловно, ближе к случайной, чем к регулярной, согласно нашим данным, $\frac{Rq}{Ra} = 1,21-1,26$, что практически совпадает в пределах погрешности с теоретическим значением для нормального случайного профиля [9].

К сожалению, в ГОСТ Р ИСО 4287-2014 отсутствует статистически стабильный параметр, характеризующий среднюю высоту шероховатого слоя, каким был параметр Rz в ранних редакциях ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82. Параметры Rz (в актуальных версиях стандартов) и Rt являются экстремальными, т.е. определяются единичным значением на соответствующей длине, а следовательно, подвержены влиянию отдельных нехарактерных единичных выступов и царапин, а также загрязнений. Усреднение по нескольким базовым длинам может несколько уменьшить разброс значений этих параметров, но они все равно могут существенно меняться от измерения к измерению.

В японском национальном стандарте *JIS B 0601:2013* сохранился параметр, аналогичный параметру Rz в его прежней трактовке: он обозначается $RzJIS$ и применим только к профилю шероховатости.

3.3.2. Параметры расстояния (ширины) элементов профиля

Средняя ширина элементов профиля PSm, RSm, WSm – средняя ширина элемента профиля Xs (см. рис. 3.4) в пределах базовой длины:

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i. \quad (3.1)$$

Формула (3.1) является определением параметров PSm , RSm , WSm . Для практических целей удобнее воспользоваться очевидной формулой (на примере профиля шероховатости):

$$RSm = \frac{2l_m}{k_m - 1},$$

где l_m – длина отрезка средней линии профиля шероховатости между первым и последним нечетным пересечениями ее профилем шероховатости в пределах базовой длины; k_m – номер этого последнего пересечения (счет ведется с номера один).

Определение других параметров рельефа поверхности по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 можно найти в тексте стандарта и в литературе [8]. В отдельный раздел нами вынесено описание такого важного для трибологии параметра, как кривая коэффициента смятия профиля (см. разд. 3.4).

В заключение приведем таблицу сравнения основных параметров шероховатости, регламентируемых действующими отечественными стандартами (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Сравнение параметров шероховатости поверхности

Наименование параметра	Используется и обозначается в стандарте			Определяется в пределах длины по ГОСТ Р ИСО 4287-2014
	ГОСТ Р ИСО 4287-2014	ГОСТ 2789-73	ГОСТ 25142-82	
Арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля	Ra	Ra	Ra	lr
Среднеквадратичное отклонение профиля	Rq	–	Rq	lr
Максимальная высота профиля	Rz	$Rmax$	$Rmax$	lr
Высота неровностей профиля по 9 точкам	–	Rz	Rz	lr
Максимальная высота пика (выступа) профиля	Rp	Rp	Rp	lr
Наибольшая глубина впадины профиля	Rv	Rv	Rv	lr
Общая высота профиля	Rt	–	–	ln
Средняя высота элементов профиля	Rc	–	–	lr
Средняя ширина элементов профиля	RSm	Sm	Sm	lr
Средний шаг местных выступов профиля	–	S	S	lr
Коэффициент смятия профиля	$Rmr(c)$	tp	tp	ln

Примечание. В ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 все параметры оцениваются на базовой длине.

3.3.3. Стандарт ISO 21920-2:2021

Международный стандарт ISO 4287:1996, с которым гармонизирован российский ГОСТ Р ИСО 4287-2014, в 2021 году заменен на новый стандарт ISO 21920-2:2021 «*Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*» («Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности: Профиль. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности»).

Некоторые наиболее существенные изменения в новом стандарте состоят в следующем.

Параметры структуры поверхности, как правило, определяются в пределах длины оценки le (*evaluation length*), а не усреднением соответствующих значений по нескольким (по умолчанию пяти) базовым длинам (*sampling length*). Это относится, в частности, к таким параметрам, как Ra , Rq , и соответствующим параметрам для первичного профиля и профиля волнистости. Термин “*sampling length*” (базовая длина) заменен термином “*section length*” (официального эквивалентного русского термина нет) с обозначением lsc .

Исключение сделано для высотных параметров Rp , Rv , Rz , которые по-прежнему определяются в пределах *section length* с последующим усреднением по количеству длин $nsc = le/lsc$ (по умолчанию $nsc = 5$). Соответственно используются новые параметры Rpt , Rvt , Rzx : Rpt – наибольшая высота пика (максимальное значение из nsc значений); Rvt – наибольшая глубина впадины (определяется аналогично); Rzx – максимальная разность наивысшей и наинизшей ординат профиля на длине lsc из числа всех nsc длин.

Уточнен алгоритм расчета параметра RSm , который стал обозначаться Rsm .

3.4. Опорная кривая

Параметр, именуемый в ГОСТ Р ИСО 4278-2014 как кривая коэффициента смятия профиля, широко применялся в трибологии задолго до появления данного стандарта и даже самого термина «трибология» – с 1933 года [10]. В ГОСТ 25142-82 этот же параметр называется более удачно (ближе к его физическому смыслу) – относительная опорная кривая профиля. В трибологической литературе его также называют опорной кривой или кривой Эбботта – Файрстоуна (по имени авторов публикации [10], в которой он был предложен). В этом разделе будем использовать обозначения параметров шероховатости по ГОСТ 25142-82.

Как параметр структуры поверхности опорная кривая характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя и учитывает в комплексе форму единичных неровностей поверхности и их распределение

по высоте. По сути, ее можно интерпретировать как интегральную функцию распределения ординат профиля на длине оценивания.

С точки зрения эксплуатационных свойств опорная кривая характеризует несущую способность поверхности, ее износостойкость, герметичность стыка поверхностей и другие функциональные свойства.

Принцип построения опорной кривой иллюстрируется рис. 3.6, на котором слева приведен пример профиля шероховатости, а справа – собственно опорная кривая. Она строится в координатах η_p , p , где η_p – опорная длина профиля – сумма длин отрезков b_i , отсекаемых на заданном уровне p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i.$$

Уровень сечения профиля p – расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов (рис. 3.6). Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля.

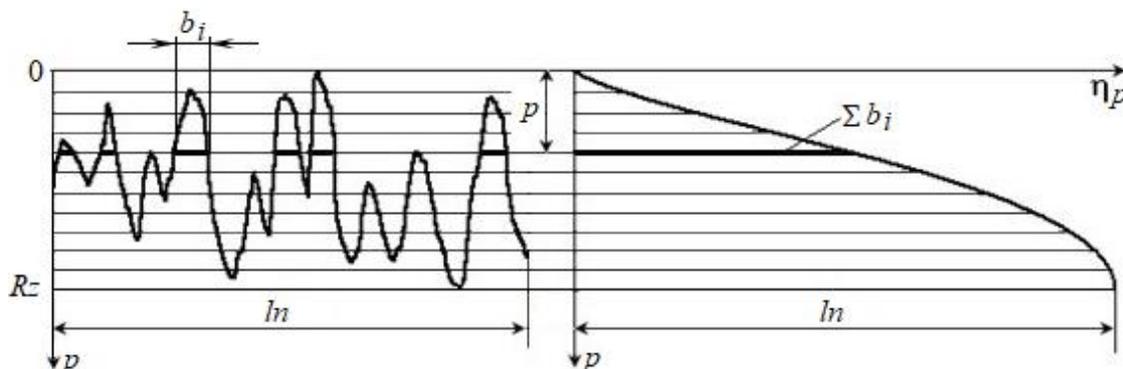


Рис. 3.6. Построение опорной кривой

Очевидно, что опорную кривую, графически выражающую зависимость опорной длины профиля от уровня сечения профиля, можно описать некоторой функцией

$$\eta_p = f(p), \quad (3.2)$$

или в безразмерных координатах

$$t_p = f\left(\frac{p}{R_z}\right) \quad (3.3)$$

($t_p = \frac{\eta_p}{l_n}$ – относительная опорная длина профиля).

Достоинство опорной кривой как параметра рельефа поверхности состоит в том, что для поверхности, имеющей однородную случайную шероховатость, опорные кривые профиля и поверхности совпадают [11]. Таким образом, опорная кривая является пространственной топографической характеристикой, а не профильной, как Ra , RSm и другие дискретные характеристики. Физический смысл опорной кривой как параметра пространственного рельефа поверхности состоит в том, что она показывает закономерность нарастания площади сечения материала (опорной площади) по глубине шероховатого слоя:

$$\frac{A_p}{A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_{pi}}{A_n} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{l_n} = t_p,$$

где A_p – суммарная площадь сечения выступов на уровне p ; ΔA_{pi} – площадь сечения i -го выступа на уровне p ; A_n – площадь рассматриваемого участка поверхности.

Для того чтобы использовать опорную кривую в трибологических расчетах характеристик контакта, необходимо иметь математическое выражение функций в уравнениях (3.2) и (3.3). Широкое распространение получило описание начальной части опорной кривой в виде степенной зависимости [11]:

$$t_p = \frac{A_p}{A_n} = t_m \left(\frac{p}{R_p} \right)^v, \quad (3.4)$$

где t_m – относительная опорная длина на уровне средней линии; v – показатель степени; нестандартный параметр профиля t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, т.е. при $p = R_p$. Параметры t_m и v определяются на основании характеристик шероховатости [11]: t_m – непосредственно по профилограмме, v – по формуле

$$v = 2t_m \left(\frac{R_p}{R_a} \right) - 1.$$

Для примера на рис. 3.7 приведены опорные кривые поверхностей серебряного и стального образцов после полирования. Видно, что степенная аппроксимация (3.4) хорошо согласуется с экспериментальными опорными кривыми.

В табл. 3.3 даны примерные значения параметров v и t_m для различных видов обработки [11].

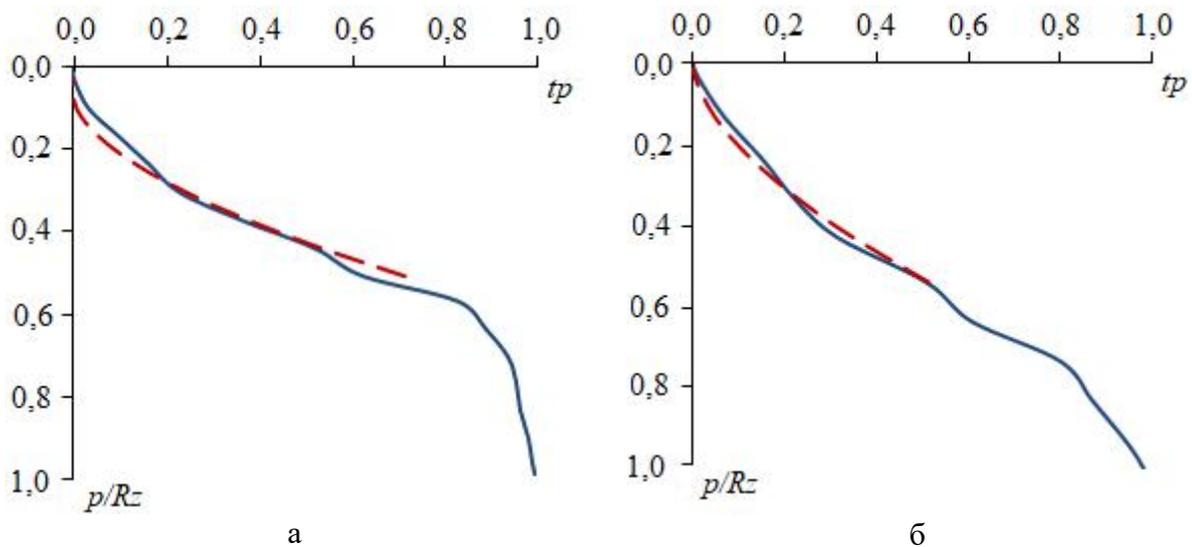


Рис. 3.7. Опорные кривые профиля: а – стальной; б – серебряной поверхности; сплошные линии – эксперимент; пунктирные – аппроксимация по формуле (3.4)

Таблица 3.3. Типичные значения параметров опорной кривой

Технология обработки	ν	t_m
Точение, строгание, фрезерование	1,2–2	0,4–0,5
Шлифование	1,6–3	0,4–0,5
Полирование	2–3	0,6–0,7

Уравнение (3.4) справедливо только для верхней части опорной кривой (практически до средней линии), но это не должно смущать. При контактировании шероховатых поверхностей взаимодействуют лишь вершины наиболее высоких выступов, соответствующие начальному участку опорной кривой. Деформация шероховатого слоя на величину $p > Rp$ невозможна в принципе.

3.5. Характеристики формы неровностей

Среднеквадратичный угол наклона оцениваемого профиля $R\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$ – это среднеквадратичное значение углов наклона ординаты $dZ(x)/dx$ (рис. 3.8) в пределах базовой длины (стандартная характеристика по ГОСТ Р ИСО 4287-2014).

Наиболее распространенной моделью выступов шероховатости является эллиптическая (в частном случае сферическая), поэтому для характеристики формы выступов используются радиусы кривизны вершин выступов и выступов в целом.

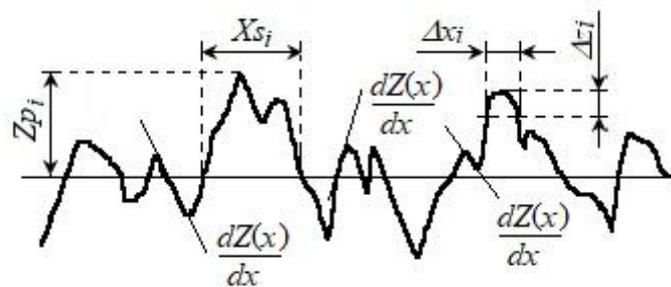


Рис. 3.8. Определение характеристик формы неровностей шероховатости

Радиус кривизны вершин выступов профиля (нестандартная характеристика) определяется по формуле

$$r_i = \frac{(\Delta x_i)^2}{8\Delta z_i},$$

где Δx_i – длина сечения выступа линией, параллельной средней линии, на расстоянии Δz_i от вершины (см. рис. 3.8). Рекомендуется принимать $\Delta z_i = 0,05 \cdot R_z$ [11]. Среднее значение радиуса кривизны вершин выступов определяют для продольной и поперечной шероховатости (вдоль следов обработки и перпендикулярно им) как среднее арифметическое значение для пяти наиболее высоких вершин в пределах базовой длины. В расчетах используют эквивалентный радиус кривизны, определяемый как среднее геометрического продольного $r_{\text{прод}}$ и поперечного $r_{\text{поп}}$ радиусов:

$$r = \sqrt{r_{\text{прод}} r_{\text{поп}}}.$$

Радиус кривизны выступов профиля рассчитывают аналогично:

$$r_{mi} = \frac{(X_{Si})^2}{8Z_{Pi}}, \quad (3.5)$$

где X_{Si} – длина сечения выступа средней линией; Z_{Pi} – расстояние от вершины выступа до средней линии (см. рис. 3.8). В расчетах используют среднее арифметическое значение радиусов кривизны пяти наиболее высоких выступов. Для анизотропной поверхности (с выраженным направлением следов обработки) рассчитывают продольный $r_{m\text{прод}}$ и поперечный $r_{m\text{поп}}$ радиусы и эквивалентный радиус кривизны выступов:

$$r_m = \sqrt{r_{m\text{прод}} r_{m\text{поп}}}.$$

Поскольку в формуле (3.5) среднее значение длины сечения выступов средней линией $\langle X_s \rangle \approx R_{Sm} t_m$, а среднее значение величины $\langle Z_p \rangle \approx 0,8R_p$, среднее значение радиуса кривизны выступов профиля можно рассчитать по формуле

$$r_m \approx 0,15 \frac{R_{Sm}^2 t_m^2}{R_p}.$$

3.6. Вероятностно-статистические характеристики рельефа поверхности твердого тела

Характеристиками ансамбля неровностей поверхности как на микро-, так и на наномасштабном уровне являются статистические функции, описывающие распределение соответствующих случайных величин. Под случайными величинами понимаются высоты выступов шероховатой поверхности, радиусы закругления их вершин, наклон неровностей, их шаг, высота ординат профиля шероховатости и др.

В механике контактного взаимодействия большое значение имеют плотности вероятности высот и радиусов закругления вершин выступов шероховатости. Эти функции используются в классических моделях дискретного контакта шероховатых поверхностей И.В. Крагельского – Н.Б. Демкина [12] и Дж. Гринвуда – Дж. Вильямсона [13], позволяющих рассчитать основные эксплуатационные характеристики контакта.

Для описания плотности вероятности параметров микрогеометрии хорошо зарекомендовало себя достаточно гибкое двухпараметрическое бета-распределение [14], ограниченное диапазоном случайных величин в относительном выражении [0; 1]:

$$f(x) = \frac{1}{B(\xi, \omega)} x^{\xi-1} (1-x)^{\omega-1}, \quad (3.6)$$

где x – случайная величина (относительная высота выступа Z_p/R_p или относительный радиус вершины выступа r/r_{\max}); $B(\xi, \omega)$ – бета-функция Эйлера; ξ и ω – параметры бета-распределения.

Возможность применения бета-распределения для описания характеристик нанощероховатости технических поверхностей показана на рис. 3.9. Экспериментальные распределения случайных величин представлены полигоном частот, теоретические – плавными кривыми, соответствующими уравнению (3.6).

Параметры формы бета-распределения ξ и ω следующие:
для распределения высот выступов (рис. 3.9а) $\xi = 1,23$, $\omega = 1,74$;

для распределения радиусов кривизны вершин выступов (рис. 3.9б) $\xi = 1,87$, $\omega = 3,18$.

Распределения как высот, так и радиусов кривизны вершин выступов несимметричные, наиболее вероятные значения относительных случайных величин Z_p/R_p и r/r_{\max} равны 0,24 и 0,28 соответственно, т.е. преобладают выступы с относительно малыми высотами и радиусами кривизны вершин.

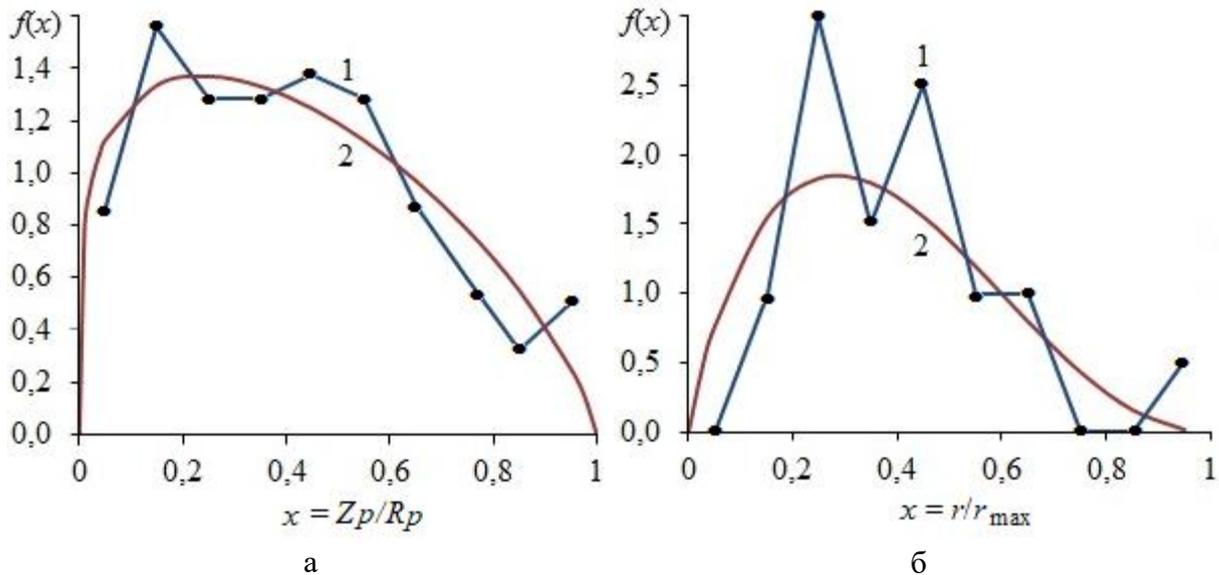


Рис. 3.9. Плотность вероятности: а – высот вершин выступов; б – радиусов кривизны выступов наносероховатости стальной поверхности; 1 – полигон частот; 2 – теоретическая функция бета-распределения; Z_p и r – абсолютные значения высоты и радиуса вершины случайного выступа наносероховатости; R_p и r_{\max} – максимальные значения указанных величин

В заключение следует отметить, что, в отличие от распределения высот выступов, распределения радиусов кривизны их вершин на профиле и на поверхности различаются незначительно [15].

3.7. Параметры трехмерного рельефа поверхности

Профильные характеристики рельефа поверхности твердых тел широко применяются благодаря их совершенному метрологическому обеспечению. Первый профилограф был создан еще в 30-х годах прошлого века, и с тех пор возможности профилографии значительно расширились [5]. Однако двумерные измерения рельефа поверхности не всегда адекватно характеризуют ее качество и эксплуатационные свойства.

Трехмерные измерения рельефа поверхности дают более реалистичные оценки качества поверхности и статистически более информативны. Современные технические средства позволяют получить

трехмерное изображение поверхности вплоть до наномасштабного уровня (рис. 3.10).

Соответственно, возникла необходимость в нормативных документах, регламентирующих параметры пространственной оценки рельефа поверхности. В настоящее время в Российской Федерации такие параметры определяются стандартом ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 «Геометрические характеристики изделий (*GPS*). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности».

Параметры трехмерной структуры во многом сходны с рассмотренными выше профильными параметрами.

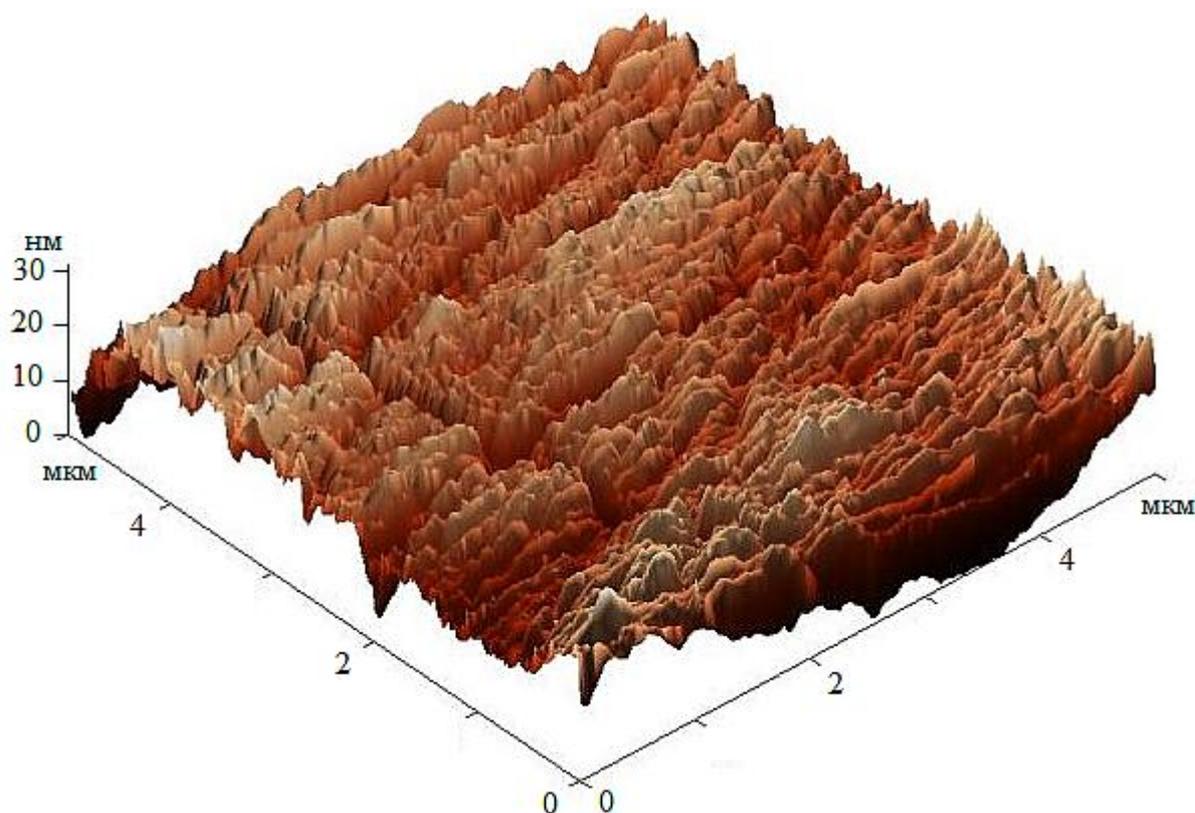


Рис. 3.10. Трехмерное изображение поверхности стального образца, полученное с помощью атомного силового микроскопа

Стандарт ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 так же, как и в случае профильных методов, предусматривает процедуру фильтрации. *S-фильтр* удаляет с поверхности мелкие побочные компоненты, *L-фильтр* – крупные побочные компоненты.

В стандарте определены следующие высотные параметры [8].

Среднеквадратичное значение высоты поверхности ограниченного масштаба S_q , S_q – это среднеквадратичное значение ординаты $z(x, y)$ в области определения. Параметр, аналогичный профильному параметру R_q .

Арифметическое среднее значение высоты поверхности ограниченного масштаба S_a , S_a – это арифметическое среднее

абсолютного значения ординаты $z(x, y)$ в области определения. Параметр, аналогичный профильному параметру Ra .

Максимальная высота пика поверхности ограниченного масштаба S_p , S_p – это наибольшее значение высоты пика от средней плоскости в области определения.

Максимальная высота провала поверхности ограниченного масштаба S_v , S_v – это отрицательное значение наибольшей высоты провала от средней плоскости в области определения.

Максимальная высота поверхности ограниченного масштаба S_z , S_z – это сумма максимальной высоты пика и максимальной высоты провала в области определения.

Параметры S_p , S_v и S_z аналогичны соответствующим профильным параметрам.

Пространственные параметры существенно отличаются от аналогичных профильных параметров и здесь не рассматриваются.

Для характеристики формы элементов поверхности используется параметр S_{dq} , S_{dq} – *среднеквадратичный градиент поверхности ограниченного масштаба* – среднеквадратичное значение градиента поверхности в области определения. Параметр, аналогичный профильному параметру $R\Delta q$.

Используется также аналогичный профильному параметру *коэффициент смятия ареала поверхности ограниченного масштаба* $S_{mr}(c)$, $S_{mr}(c)$ – это отношение площади материала при указанной высоте c к области оценки. Данный параметр связан с интегральной функцией вероятности ординат образца и не просто аналогичен профильному параметру $R_{mr}(c)$, а для случайных поверхностей численно равен ему. Соответственно, опорные кривые случайной поверхности и ее профиля должны совпадать, что и подтверждается экспериментально (рис. 3.11).

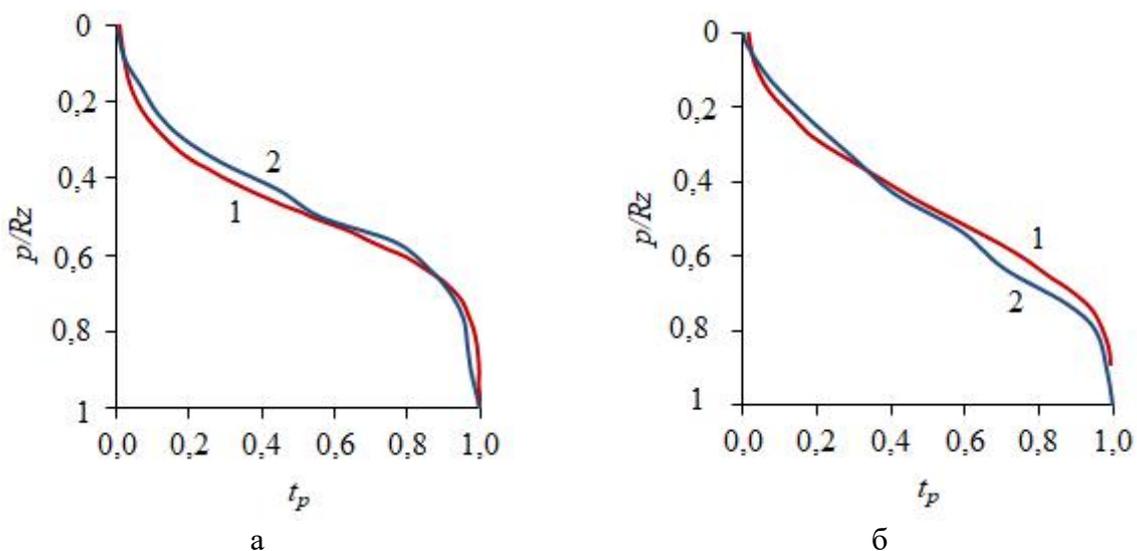


Рис. 3.11. Экспериментальные опорные кривые поверхности (1) и профиля (2) для металлических образцов после полирования:

а – стальной образец; б – серебряный образец

3.8. Методы оценки рельефа поверхности

Для измерения шероховатости используется целый ряд методов. Наиболее широко применяются методы, которые оценивают рельеф поверхности по ее профилю. В свою очередь, среди профильных методов чаще всего используются оптические и щуповой (стилусный) [5, 7].

3.8.1. Оптические методы

Примером простого в эксплуатации оптического метода может служить метод светового сечения [4], когда на исследуемую поверхность проецируется под углом 45° узкая ярко освещенная щель (рис. 3.12). Изображение щели на исследуемой поверхности наблюдают в микроскоп (направление B). Если поверхность имеет неровности, то проекция воспроизводит форму профиля. Размеры элементов профиля (например, высота неровностей Z) измеряются с помощью микроскопа с учетом его увеличения. Метод применяется для сравнительно грубошероховатых поверхностей.

Для контроля качества сравнительно гладких поверхностей используется интерференционный метод (рис. 3.13), когда качество поверхности оценивается по интерференционной картине от сложения двух когерентных лучей, один из которых отражен от исследуемой поверхности. Рассмотрим реализацию интерференционного метода на примере микроинтерферометра Линника, представляющего собой компактный вариант известного интерферометра Майкельсона, размером с типичный металлографический микроскоп. Принципиальная схема микроинтерферометра Линника представлена на рис. 3.14.

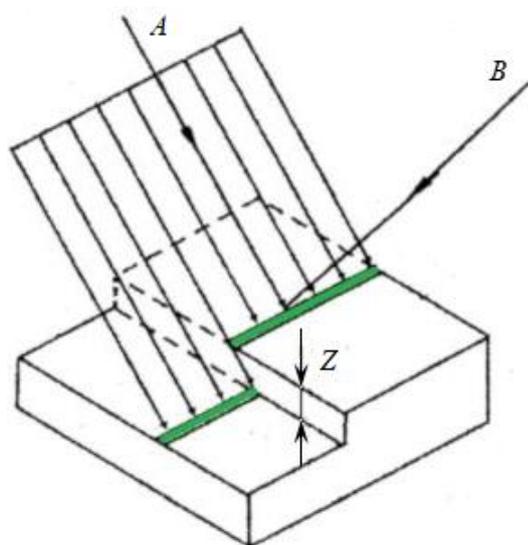


Рис. 3.12. Принцип метода

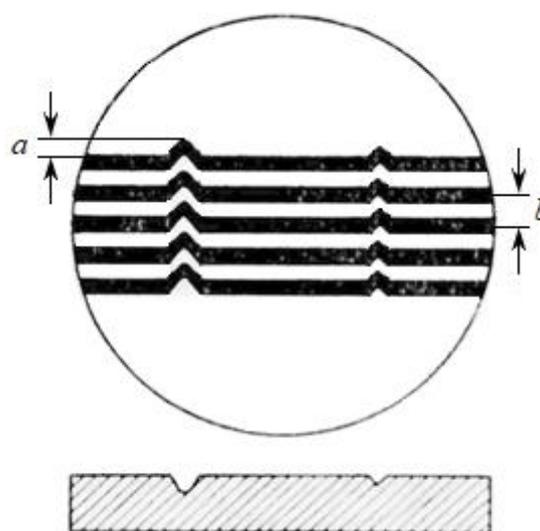


Рис. 3.13. Принцип

светового сечения:
A – ось проецирующего микроскопа;
B – ось микроскопа наблюдения

интерференционного
 метода контроля
 качества поверхности

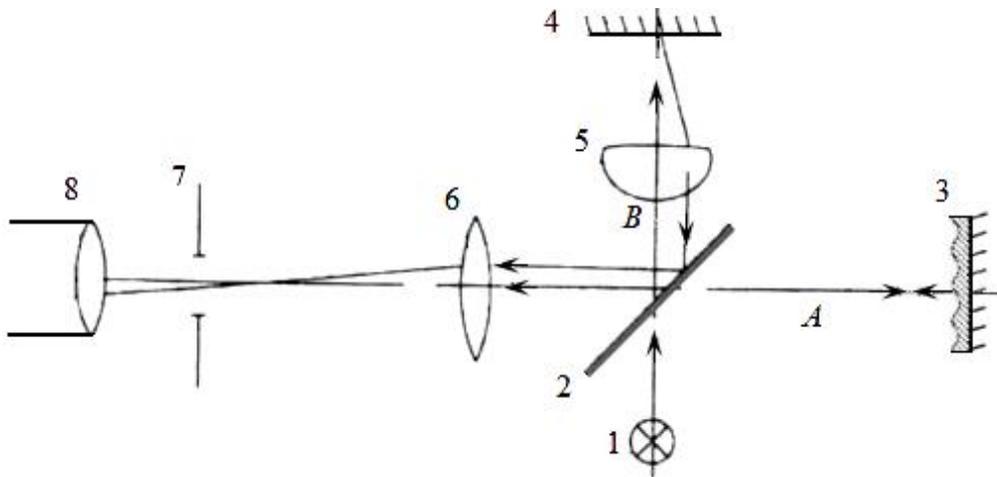


Рис. 3.14. Схема микроинтерферометра Линника

Монохроматический свет от источника 1 (например, лазера) полупрозрачной пластиной 2 делится на два когерентных луча *A* и *B*. Луч *A* попадает на исследуемую поверхность 3 и, отражаясь от нее, в плоскости 7 интерферирует с лучом *B*, отраженным от зеркала 4. Зеркало наклонено на небольшой угол относительно плоскости, перпендикулярной направлению падающего луча, и, таким образом, в плоскости посредством линз 5 и 6 наблюдается результат интерференции лучей, отраженных от исследуемой поверхности и зеркала. Интерференционная картина имеет вид полос равной толщины в виде чередующихся максимумов и минимумов освещенности (см. рис. 3.13). С помощью окуляра 8 определяют высоту неровностей по формуле

$$Z = \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda}{2^2}$$

где *a* – искривление интерференционной полосы; *b* – ширина интерференционной полосы (см. рис. 3.13); λ – длина волны света.

Существует целый ряд оптических методов и соответствующих приборов контроля качества поверхности [5, 7]. В целом к преимуществам оптических методов можно отнести высокую скорость измерения и отсутствие повреждений исследуемой поверхности благодаря их бесконтактному характеру, что позволяет исследовать даже очень мягкие материалы и покрытия. Сводится к минимуму механический износ деталей измерительного устройства. Интерференционные методы имеют высокое разрешение по вертикали. Благодаря этим достоинствам оптические методы остаются в арсенале метрологических служб.

3.8.2. Щуповые (стилузные) методы

Щуповой метод состоит в том, что по исследуемой поверхности перемещается щуп (стилуз) в виде конуса с малым радиусом закругления вершины. В приборах для измерения параметров шероховатости этот радиус обычно равен 2–10 мкм. Материал щупа – алмаз или сапфир. При движении щупа по поверхности его перемещения в вертикальном направлении повторяют неровности профиля. Эти перемещения преобразуются в аналоговый электрический сигнал индуктивным, реже оптическим, пьезоэлектрическим или емкостным преобразователем с дальнейшей цифровой обработкой. Обработка сигнала может осуществляться встроенным микропроцессорным блоком, а также специализированным программным обеспечением при выводе сигнала на компьютер.

Радиус щупа атомного силового микроскопа составляет 1–50 нм, материал – кремний и его соединения (SiO_2 , Si_3N_4). Щуп сканирующего туннельного микроскопа (который, напомним, должен быть проводящим) изготавливают из тонкой металлической проволоки, например вольфрамовой.

Типовая схема лабораторного профилометра для измерения параметров микрошероховатости показана на рис. 3.15.

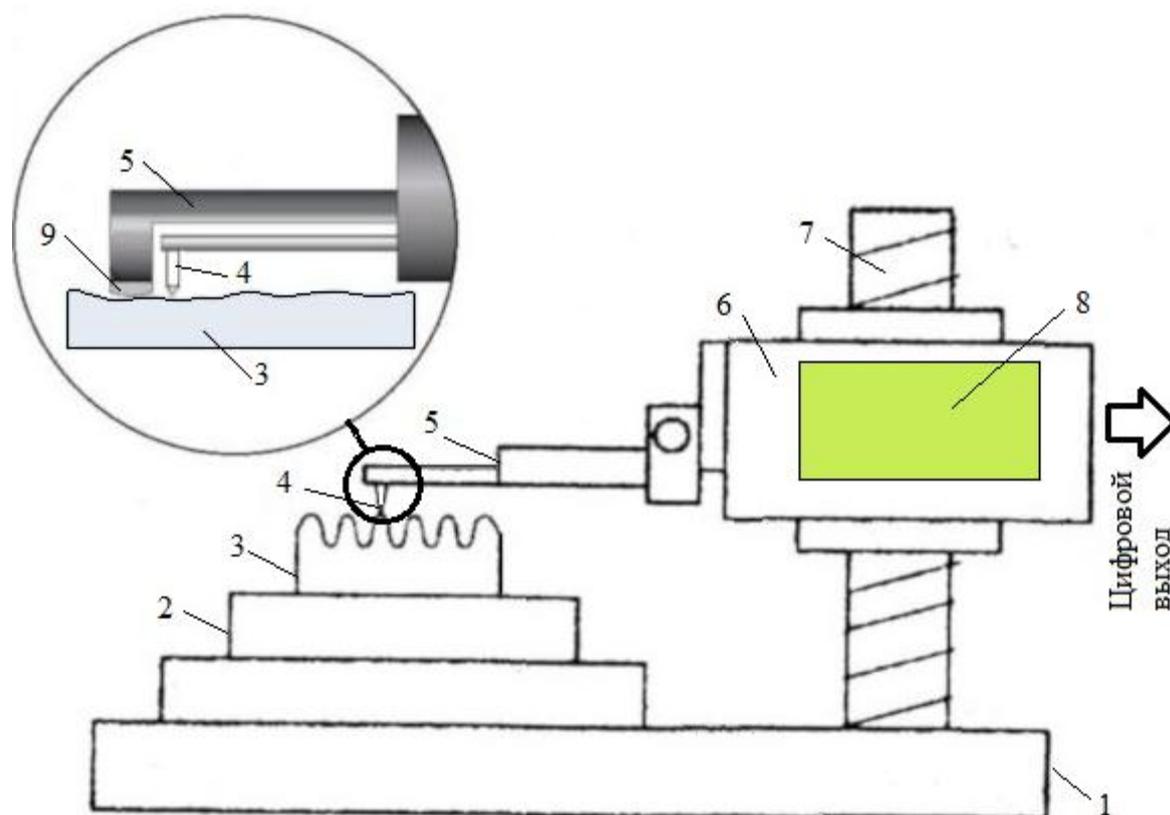


Рис. 3.15. Схема профилометра для измерения микрошероховатости

На основании 1 крепится предметный столик 2, обычно с возможностью двухкоординатного перемещения в горизонтальной плоскости. На столик помещают образец 3. Датчик 5 со щупом 4 приводится в движение блоком привода 6, прикрепленным с помощью подвижной каретки к стойке (колонне) 7. Блок привода обычно снабжен небольшим дисплеем 8, на который выводится необходимая информация, в том числе стандартные параметры рельефа исследуемой поверхности. В некоторых случаях блок делается съемным и может работать автономно от аккумулятора. Тогда он ставится непосредственно на измеряемую поверхность и позволяет контролировать ее качество в производственных условиях.

Датчик обычно базируется на измеряемую поверхность с помощью опоры 9, как это показано в увеличенном виде на рис. 3.15 слева вверху. Опора имеет большой радиус закругления и нечувствительна к неровностям шероховатости. При движении по поверхности образца опора скользит по ней, описывая огибающую профиля, а щуп копирует профиль поверхности за вычетом огибающей. Таким образом механически отфильтровывается длинноволновая компонента профиля. Возможен также вариант, когда датчик базируется не на поверхность образца, а на эталонную плоскую поверхность (на рисунке не показана). В этом случае фильтрация длинноволновой компоненты не происходит.

Принцип работы сканирующего туннельного и атомного силового микроскопов и их возможности в исследовании рельефа поверхности на наномасштабном уровне описаны в гл. 2, разд. 2.8.3.3.2. Иллюстрацией этих возможностей служит трехмерное АСМ-изображение (см. рис. 3.10).

Основным недостатком классических щуповых методов является контакт щупа с поверхностью, отсюда возможность повреждения поверхности и износ самого щупа. От этого недостатка свободен сканирующий туннельный микроскоп. Другой, менее критический недостаток щуповых методов – малая скорость измерения. К их достоинствам можно отнести простоту и широкие возможности обработки сигнала, имеющего на выходе из прибора цифровую форму. Достоинством щуповых методов можно также считать возможность измерения не только геометрических параметров поверхности, но и некоторых физических, таких как твердость, сила трения.

Список литературы к главе 3

1. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.
2. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
3. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.
4. Клепиков В.В., Порошин В.В., Голов В.А. Качество изделий: учебное пособие. М.: МГИУ, 2008. 288 с.
5. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 472 с.
6. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
7. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности: учебное издание. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. 400 с.
8. Иванов И.А., Губенко С.И., Кононов Д.П. Поверхность деталей машин и механизмов: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 156 с.
9. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.
10. Abbot E.J., Firestone F.A. Specifying surface quality // Mechanical Engineering. 1933. V. 55. № 9. P. 569–572.
11. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
12. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
13. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proc. Roy. Soc. 1966. V. A295. № 1442. P. 300–319.
14. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел // Трение и износ. 1983. Т. IV. № 6. С. 983–990.
15. Izmailov V.V., Kourova M.S. Correlation between surface topography and profile statistical parameters // Wear. 1980. V. 59. P. 409–421.

ГЛАВА 4. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЛАДКИХ ТЕЛ ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Данная глава предваряет рассмотрение контактного взаимодействия технических поверхностей с учетом их рельефа, т.е. микро- и шероховатости и волнистости. Необходимость этого вызвана двумя обстоятельствами.

Во-первых, для расчетов характеристик контактного взаимодействия реальных технических поверхностей элементы их рельефа (выступы шероховатости, волны) обычно моделируют телами правильной геометрической формы. Наиболее часто используются модели в виде шаровых (эллипсоидальных) или цилиндрических сегментов, клина и конуса. Для таких тел в теории упругости и пластичности решены контактные задачи, позволяющие рассчитывать деформацию, площадь контакта, напряжения на площадке контакта и в глубине материала и т.д. Сочетание этих решений с топографическими характеристиками поверхности, рассмотренными в гл. 3, дает возможность вычислять различные характеристики контакта поверхностей деталей машин.

Во-вторых, в разнообразных технических устройствах часто встречается контакт криволинейных деталей с первоначальным касанием в точке или по линии (например, контакт тел качения шариковых или роликовых подшипников с кольцом, контакт кулачка с толкателем, контакт зубьев шестерен и т.п.). Во многих случаях при расчетах характеристик таких контактных пар контактирующие тела считаются гладкими, несмотря на шероховатость их рабочих поверхностей.

Кроме геометрических моделей, в расчетах характеристик контактов деталей машин явно или неявно используются модели сплошной среды (материала), из которого изготовлены контактирующие детали. Поведение реальных материалов при деформировании сложно, поэтому для того, чтобы можно было применять математические теории упругости и пластичности, принимают упрощенные модели материала, устанавливающие взаимосвязь между деформацией ε и напряжением σ . Основные модели сплошной среды, используемые в расчетах характеристик контакта твердых тел, иллюстрируются рис. 4.1.

Основные виды контактирования гладких тел правильной геометрической формы рассмотрены ниже.

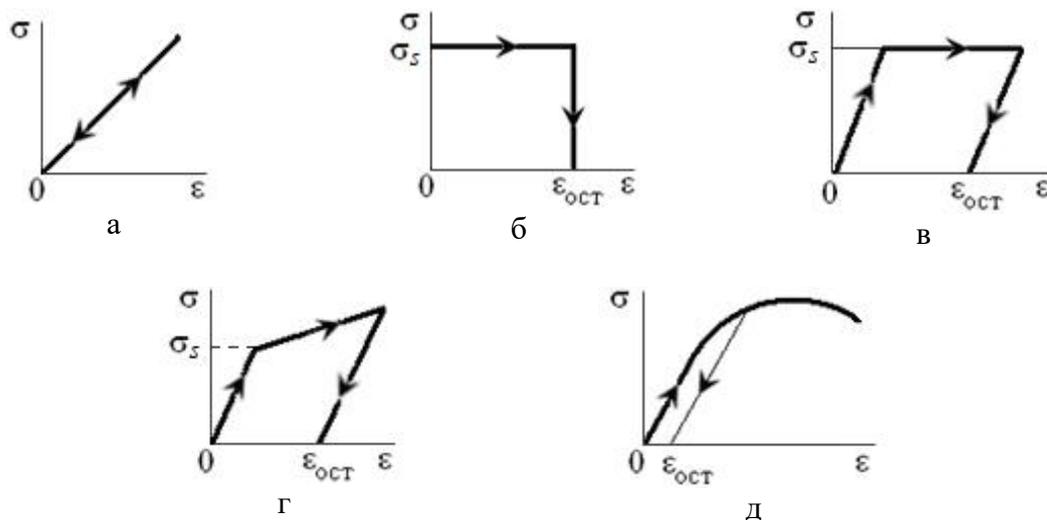


Рис. 4.1. Модели сплошной среды, используемые в расчетах контактного взаимодействия:

- а – модель идеального упругого тела;
 - б – модель жестко-идеально-пластического тела;
 - в – модель упруго-идеально-пластического тела;
 - г – модель упругопластического тела с линейным упрочнением;
 - д – диаграмма реального материала;
- σ_s – предел текучести при растяжении; $\epsilon_{ост}$ – остаточная деформация

4.1. Упругий контакт

4.1.1. Упругий контакт гладких сферических тел

Г. Герц (*H. Hertz*) в 1881 году теоретически описал контакт двух гладких криволинейных упругих тел с первичным касанием в точке (рис. 4.2). При этом приняты следующие допущения: материалы контактирующих тел однородны и изотропны; их деформации носят упругий характер (см. модель материала на рис. 4.1а); размеры зоны контакта малы по сравнению с размерами контактирующих тел и радиусами кривизны их поверхностей в точке касания; в зоне контакта действуют только нормальные напряжения, касательные напряжения отсутствуют.

Герц показал, что в случае контакта двух упругих тел, ограниченных сферическими поверхностями, площадка контакта имеет форму круга. Распределение нормального давления по площадке контакта (рис. 4.3) описывается формулой

$$p(\rho) = p_0 \left(1 - \frac{\rho^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где a – радиус площадки контакта; ρ – текущее значение радиуса; p_0 – максимальное давление в центре контакта, которое в 1,5 раза больше среднего:

$$p_{cp} = \frac{N}{\pi a^2},$$

где N – сила, сжимающая тела.

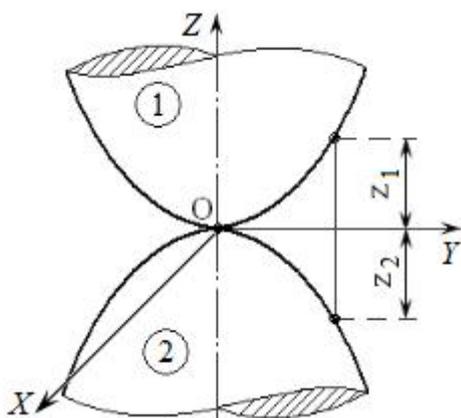


Рис. 4.2. Упругий контакт двух криволинейных тел (1 и 2) с первоначальным касанием в точке

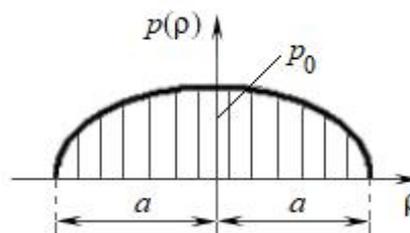


Рис. 4.3. Распределение давления по площадке контакта

Основные характеристики контакта двух сферических тел приведены в табл. 4.1. К ним относятся радиус площадки контакта a ; сближение контактирующих тел δ (расстояние, на которое сближаются две точки, лежащие на оси контакта и удаленные от площадки контакта); максимальное и среднее давления в контакте.

Таблица 4.1. Характеристики упругого контакта гладких сферических тел [1, 2]

Характеристика контакта	Формула
Радиус площадки контакта	$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}}$
Сближение	$\delta = \frac{a^2}{r} = \left(\frac{9}{16} \cdot \frac{N^2}{rE^{*2}}\right)^{\frac{1}{3}}$
Максимальное контактное давление	$p_0 = \left(\frac{6NE^{*2}}{\pi^3 r^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{N}{\pi a^2}$
Среднее контактное давление	$p = \frac{2}{3} p_0 = \frac{N}{\pi a^2}$

В расчетах используются эквивалентные характеристики контактирующих тел:

эквивалентный модуль упругости (модуль Юнга)

$$E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1},$$

где E_1 и E_2 – модули Юнга первого и второго тела соответственно; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона;

эквивалентный радиус кривизны

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}, \quad (4.1)$$

где r_1 и r_2 – радиусы кривизны первого и второго тела в точке касания.

Отметим, что формулы, приведенные в табл. 4.1, применимы не только для тел строго сферической формы, но и для любых других, профили которых в окрестности точки первоначального касания можно описать формулами:

$$z_1 \approx \frac{x^2}{2r_1'} + \frac{y^2}{2r_1''},$$

$$z_2 \approx \frac{x^2}{2r_2'} + \frac{y^2}{2r_2''},$$

где r_i' и r_i'' – главные радиусы кривизны контактирующих поверхностей в точке касания (они имеют наибольшее и наименьшее значения среди радиусов кривизны всех сечений в данной точке). Если контактирующие тела являются фигурами вращения, то $r_i' = r_i''$, в противном случае в расчетах используют эквивалентный радиус кривизны $r_i = \sqrt{r_i' \cdot r_i''}$.

4.1.2. Упругий контакт гладких цилиндрических тел

Теория Герца применима и к контакту цилиндрических тел, оси которых не параллельны (пересекаются). В случае скрещенных под прямым углом цилиндров радиусами r_1 и r_2 эквивалентный радиус кривизны определяется аналогично тому, как это делается для контактирующих шаров (см. уравнение (4.1)). Основные характеристики контакта скрещенных цилиндров представлены в табл. 4.2.

Характеристики контакта гладких цилиндрических тел с параллельными осями также приведены в табл. 4.2. Если оси цилиндров

параллельны, то решение Герца неприменимо. Дело в том, что в этом случае сближение контактирующих тел зависит не только от локальных контактных напряжений, но и от распределения напряжений во всем объеме деформируемого цилиндра.

Другой важной особенностью контакта цилиндрических тел с параллельными осями является то, что вблизи торцов возникает концентрация контактных напряжений. Это обстоятельство необходимо учитывать, например, при проектировании роликовых подшипников и других подобных устройств.

Таблица 4.2. Характеристики упругого контакта гладких цилиндрических тел [1–3]

Характеристика контакта	Скрещенные под прямым углом цилиндры	Параллельные цилиндры
Радиус площадки контакта	$a = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}$	–
Полуширина полоски контакта	–	$b = \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{qr}{E^*} \right)^{\frac{1}{2}}$
Сближение	$\delta = \left(\frac{9}{32} \cdot \frac{N^2}{rE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}$	$\delta = \frac{2q}{\pi} \left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1} \left(\ln \frac{4r_1}{b} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \left(\ln \frac{4r_2}{b} - \frac{1}{2} \right) \right]$
Максимальное контактное давление	$p_0 = \left(\frac{3}{2\pi^3} \cdot \frac{NE^{*2}}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}}$	$p_0 = \left(\frac{qE^*}{\pi r} \right)^{\frac{1}{2}}$
Среднее контактное давление	$p = \frac{2}{3} p_0 = \frac{N}{\pi a^2}$	$p = \frac{q}{2b} = \frac{\pi}{4} p_0$

Примечание. $q = \frac{N}{L}$ – погонная нагрузка (нагрузка на единицу длины контакта);
 L – длина цилиндра.

4.2. Контакт жестко-идеально-пластических тел

При достаточно больших нагрузках, развитием пластическом течении, когда упругие деформации материала пренебрежимо малы, можно использовать модель материала в виде жестко-идеально-пластического тела (см. рис. 4.1б). Для такого материала в теории пластичности имеются решения контактных задач, позволяющие рассчитать контактное давление в зависимости от формы контактирующих тел. При этом обычно рассматривают отдельно внедрение жестких тел правильной формы (клина, конуса, шара) в гладкое пластическое полупространство и смятие пластического тела правильной формы абсолютно жестким плоским

штампом. Кроме того, результаты зависят от условий трения на поверхности контакта жесткого тела с пластическим. Эти условия могут меняться от полного отсутствия контактного трения до практически полной адгезии на поверхности контакта. Условия трения на границе контактирующих тел характеризуют коэффициентом контактного трения $\mu_k = \frac{\tau}{\sigma}$, где τ – касательные напряжения на поверхности контакта; σ – нормальные напряжения.

При отсутствии контактного трения очевидно, что $\tau = 0$ и $\mu_k = 0$, при максимальной адгезии $\tau = k = \sigma_s/2$ по критерию Треска, где k – предел текучести материала при сдвиге; σ_s – предел текучести материала при одноосном растяжении. Соответственно, при максимальной адгезии $\mu_k = 0,5$. В общем случае $0 \leq \mu_k \leq 0,5$.

Рассмотрим некоторые наиболее важные случаи контакта жестко-идеально-пластических тел.

4.2.1. Внедрение жесткого гладкого клина в пластическое полупространство

Схематически этот случай изображен на рис. 4.4а. Клин с углом при вершине 2α считается абсолютно жестким, имеет бесконечную длину и вдавливается в пластическое полупространство. Вытесненный клином материал выдавливается в стороны. При условии несжимаемости материала полупространства площади треугольников ABC и CDE равны.

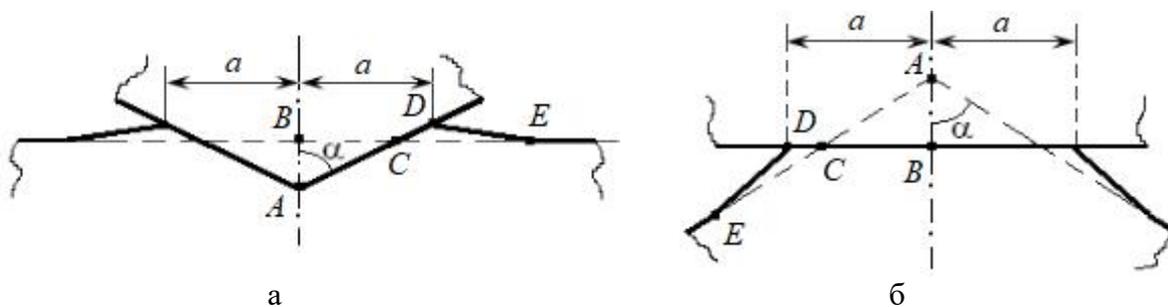


Рис. 4.4. Контакт бесконечно протяженного клина с плоским полупространством:
 а – внедрение гладкого жесткого клина в жесткопластическое полупространство;
 б – смятие пластического клина жестким плоским штампом

Среднее контактное давление при внедрении жесткого клина в пластическое полупространство зависит от угла при вершине клина и от коэффициента контактного трения. Для некоторых случаев величина среднего контактного давления представлена на рис. 4.5 [2]. При больших углах раствора клина ($\alpha \rightarrow \pi/2$) среднее контактное давление стремится к значению $p = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \approx 5,14k = 2,57\sigma_s$, что соответствует

внедрению плоского пуансона шириной $2a$ и бесконечной длины в пластическое полупространство.

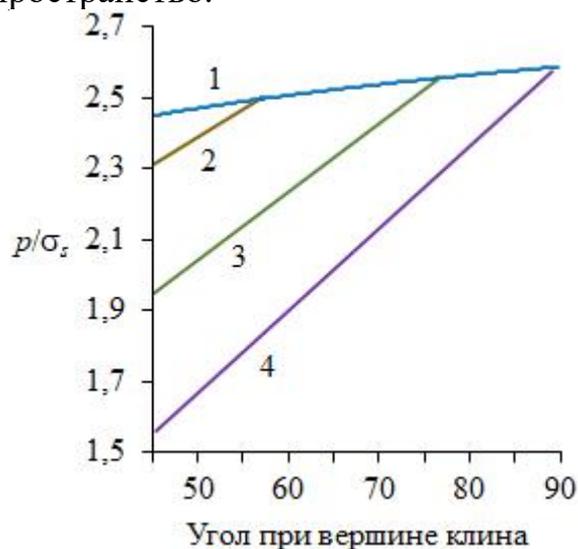


Рис. 4.5. Среднее контактное давление при внедрении жесткого клина в пластическое полупространство:
 1 – $\mu_k = 0,5$; 2 – $\mu_k = 0,2$; 3 – $\mu_k = 0,1$; 4 – $\mu_k = 0$

4.2.2. Смятие пластического клина жестким плоским штампом

Схематически этот случай представлен на рис. 4.4б. При смятии материал клина вытесняется в стороны. Из условия несжимаемости материала площади треугольников ABC и CDE равны. Величина среднего контактного давления, особенно при больших углах раствора клина, слабо зависит от величины контактного трения (рис. 4.6) [2]. Для тупого клина ($\alpha \rightarrow \pi/2$) среднее контактное давление стремится к той же величине, что и при внедрении жесткого клина: $p = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \approx 5,14k = 2,57\sigma_s$.

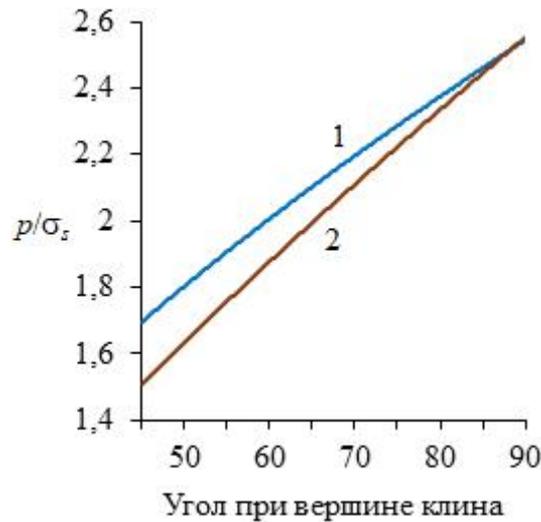


Рис. 4.6. Среднее контактное давление при смятии пластического клина жестким плоским штампом:
1 – $\mu_k = 0,5$; 2 – $\mu_k = 0$

4.2.3. Пластический контакт осесимметричных тел

В отличие от плоских задач, рассмотренных в разд. 4.2.1 и 4.2.2, решение осесимметричных задач связано с некоторыми трудностями. Тем не менее для некоторых тел такие решения имеются [2].

Внедрение жесткого конуса в пластическое полупространство. Среднее контактное давление при внедрении жесткого конуса (осесимметричная задача) незначительно превышает среднее давление при внедрении жесткого клина. Для больших углов раствора конуса ($\alpha > 60^\circ$) это превышение составляет 10–13 %. Такой разницей в расчетах процессов контактного взаимодействия шероховатых поверхностей совершенно безболезненно можно пренебречь.

Смятие пластического конуса жесткой гладкой плоскостью. Как и в случае внедрения жесткого конуса, среднее контактное давление при смятии пластического конуса немного превышает среднее давление при смятии клина. Для углов раствора конуса $\alpha > 70^\circ$ разница в величинах среднего контактного давления не превышает 15 %.

Внедрение жесткой сферы в пластическое полупространство. Ввиду практической значимости этой задачи для измерения твердости материалов по Бринеллю ей посвящено несколько теоретических работ. Согласно результатам работы [4], при изменении отношения a/r от 0 до 0,5 среднее давление в контакте меняется от $p = 2,84y_s$ до $p = 2y_s$, где a – радиус отпечатка; r – радиус шара.

Таким образом, из разд. 4.2.1–4.2.3 следует, что среднее контактное давление при пластической деформации криволинейных тел правильной геометрической формы можно выразить через предел текучести материала при одноосном растяжении:

$$p = C\sigma_s, \quad (4.2)$$

где коэффициент C меняется в пределах 2,5–3 для моделей, более или менее соответствующих форме выступов шероховатых поверхностей. Результаты многочисленных экспериментальных работ подтверждают справедливость формулы (4.2) при значении $C \approx 3$.

4.3. Переход от упругой деформации к пластической

Первые пластические деформации в материале контактирующих деталей зарождаются в точке, где напряжения достигают некоторого критического значения. Наиболее простой критерий – максимальных касательных напряжений (или критерий Треска):

$$\max[|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|] = 2k = \sigma_s,$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения; σ_s – предел текучести материала при простом одноосном растяжении; k – предел текучести при простом сдвиге.

Другой распространенный критерий – энергетический (или критерий Мизеса):

$$\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = k^2 = \frac{\sigma_s^2}{3}.$$

В случае контакта гладких сферических тел точка с максимальным касательным напряжением, в которой зарождаются первые пластические деформации, находится на оси контакта на глубине, равной примерно половине радиуса площадки контакта [2]. При значении коэффициента Пуассона $\mu = 0,3$ максимальное касательное напряжение $\tau_{\max} = 0,31p_0$, откуда находим значения максимального контактного давления, соответствующего началу пластического течения:

$$p_{0кр} \approx 3,2k = 1,6\sigma_s,$$

и критической контактной нагрузки:

$$N_{кр} = \frac{2\pi^3 r^2 \sigma_s^3}{3E^{*2}}. \quad (4.3)$$

При контактировании двух цилиндрических тел с параллельными осями опасная точка расположена на оси контакта на расстоянии примерно

0,8 от полуширины полосы контакта [2]. При значении коэффициента Пуассона $\mu = 0,3$ $\tau_{\max} \approx 0,3p_0$, откуда

$$p_{0кр} \approx 3,3k = 1,67\sigma_s,$$

а критическая погонная нагрузка

$$q_{кр} \approx \frac{8,8r\sigma_s^2}{E^*}. \quad (4.4)$$

Следует иметь в виду, что указанные критические нагрузки, рассчитанные по формулам (4.3) и (4.4), отнюдь не означают перехода материала в полностью пластичное состояние. Зона зародившейся пластической деформации остается окруженной упругим материалом, и для того, чтобы пластическая деформация распространилась на всю область контакта, требуется гораздо большая нагрузка.

4.4. Упругопластический контакт

Как показано в разд. 4.3, первые пластические деформации при упругом сжатии сферических тел появляются в глубине материала при условии $0,31p_0 = k$. Принимая во внимание, что $p_0 = (3/2)p$, нетрудно получить, что пластические деформации зарождаются при среднем контактном давлении $p \approx 1,1\sigma_s$, если $\sigma_s = 2k$ (критерий Треска), или $p \approx 1,2\sigma_s$, если $\sigma_s = \sqrt{3}k$ (критерий Мизеса). Развитому пластическому течению соответствует среднее давление $p \approx 3\sigma_s$ (см. разд. 4.2). Диапазон давлений $\sigma_s \lesssim p \lesssim 3\sigma_s$ соответствует упругопластическому контакту.

Из простых логических соображений очевидно, что в расчетах характеристик упругопластического контакта должны участвовать как упругие свойства материала (модуль Юнга E), так и пластические (предел текучести при растяжении σ_s). Следует отметить, что упругопластические контактные задачи исследованы гораздо меньше, чем упругие или пластические. В работе [2] для верхней оценки среднего контактного давления при вдавливании жесткого шара в упругопластическое полупространство предлагается зависимость

$$\frac{p}{\sigma_s} \approx \frac{2}{3} \left[2 + \ln \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{r} \right) \right]. \quad (4.5)$$

Установим пределы применимости формулы (4.5). Если появление первых пластических деформаций происходит при $p/\sigma_s \approx 1,1$, из

формулы (4.5) получим соответствующее значение безразмерного комплекса:

$$\frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{r} \approx 2.$$

Аналогично, приравнявая значение найденного по выражению (4.5) относительного давления p/σ_s величине, соответствующей наступлению развитого пластического течения ($\frac{p}{\sigma_s} = 3$), получим условие перехода к пластическому контакту:

$$\frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{r} \approx 36.$$

Таким образом, формула (4.5), выражающая фактическое контактное давление при упругопластическом контакте, справедлива в диапазоне

$$2 \lesssim \frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{r} \lesssim 36.$$

Зависимость контактного давления от безразмерного комплекса $\frac{E^*}{\sigma_s} \cdot \frac{a}{r}$ (см. выражение (4.5)) представлена на рис. 4.7 [2].

Для практических целей предпочтительно иметь критерии перехода от упругого контактирования к пластическому в виде формул для критических значений деформации (сближения) $\delta_{кр}$ и нагрузки $N_{кр}$. Их нетрудно получить из формулы (4.5), зная, что $\delta_{кр} = \frac{a_{кр}^2}{r}$, а $N_{кр} = p_{кр} \pi a_{кр}^2 = 1,1 \sigma_s \pi a_{кр}^2$:

$$\delta_{кр} = 4 \frac{\sigma_s^2 r}{E^{*2}};$$

$$N_{кр} = 14 \frac{\sigma_s^3 r^2}{E^{*2}}.$$

Нами из несколько иных предпосылок получены близкие значения критических значений сближения и нагрузки, соответствующих переходу от упругого контакта к упругопластическому [5]:

$$\delta_{кр} = 6,7 \frac{\sigma_s^2 r}{E^{*2}};$$

$$N_{кр} = 23 \frac{\sigma_s^3 r^2}{E^{*2}}.$$

Как уже отмечалось, при нагрузке, превышающей критическое значение, поначалу преобладающий характер деформации контактирующих тел остается упругим, поэтому даже за пределами упругости формулы Герца дают результаты, незначительно отличающиеся от упругопластического решения. Расхождения становятся заметными только при десятикратном превышении критической деформации (рис. 4.8).

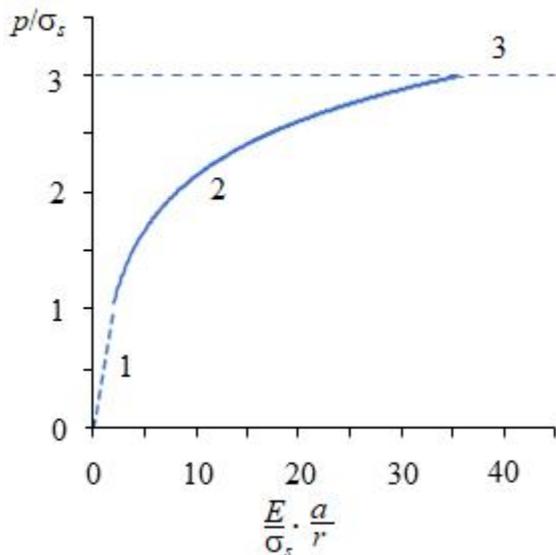


Рис. 4.7. Фактическое контактное давление как функция безразмерного комплекса $\frac{E^* a}{\sigma_s r}$:
 участок 1 – упругий контакт;
 участок 2 – упругопластический;
 участок 3 – пластический

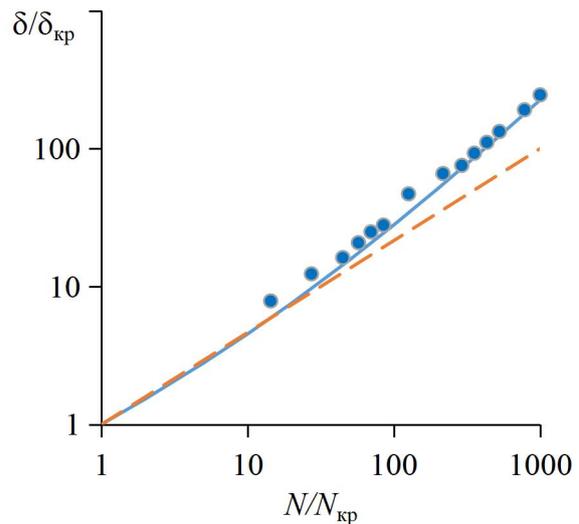


Рис. 4.8. Зависимость относительной деформации от относительной нагрузки при контакте шара с плоскостью:
 точки – экспериментальные данные [2];
 сплошная линия – упругопластический контакт;
 пунктирная – упругий контакт (формулы Герца)

Список литературы к главе 4

1. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
2. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
3. Журавлев Г.А. Карпенко В.А. Сближение упругих тел, моделируемых круговыми цилиндрами // Техника машиностроения. 2000. № 6 (28). С. 51–55.
4. Ивлев Д.Д., Непершин Р.И. Вдавливание гладкого сферического штампа в жесткопластическое полупространство // Механика твердого тела. 1973. № 4. С. 159–171.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 116 с.

ГЛАВА 5. МЕХАНИКА И ФИЗИКА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Процесс контактирования технических поверхностей рассмотрим сначала на примере более простого случая контактирования шероховатой поверхности с гладкой. Первыми контактируют с гладкой поверхностью наиболее высокие выступы шероховатости, а затем по мере сближения поверхностей в контакт вступает все большее число выступов. С возрастанием сжимающей контакт нагрузки происходит упругая деформация волн, на которых расположены неровности шероховатости. Если контактирует менее твердая шероховатая поверхность с более твердой гладкой, то выступы шероховатой поверхности в процессе деформации сминаются. Если же гладкая поверхность имеет меньшую твердость, чем шероховатая, то выступы шероховатой поверхности внедряются в гладкую поверхность. И смятие, и внедрение сопровождаются упругой осадкой выступов.

При контактировании двух шероховатых поверхностей первыми вступают в контакт уже не самые высокие выступы, а те из них, для которых сумма высот выступа первой поверхности и противолежащего ему выступа второй поверхности окажется наибольшей. По мере увеличения нагрузки в контакт вступают все новые пары противостоящих выступов, обладающие все меньшей суммой высот.

В любом случае контакт технических поверхностей, имеющих отклонения от идеальной геометрической формы, носит дискретный характер: он состоит из ансамбля малых площадок контакта отдельных пар выступов сопряженных поверхностей. Эти площадки могут группироваться на вершинах деформированных волн в отдельных кластерах. Таким образом, принято различать три вида площадей контакта технических поверхностей, которые рассматриваются ниже.

5.1. Три площади контакта технических поверхностей

На рис. 5.1 схематически показаны три площади контакта технических поверхностей. *Номинальная площадь контакта* A_n соответствует геометрическим размерам детали и задается чертежом. Площадки фактического контакта неровностей шероховатости в сумме составляют *фактическую площадь контакта* $A_r = \sum \Delta A_{ri}$. Они группируются на контурных площадках контакта отдельных волн, которые в сумме образуют *контурную площадь контакта* $A_c = \sum \Delta A_{ci}$. Фактическая площадь контакта обычно составляет от номинальной десятые и сотые доли процента, при больших контактных нагрузках может достигать

до нескольких процентов. Контурная площадь от номинальной составляет обычно несколько процентов, однако при малых размерах контактирующих тел может стремиться к единице.

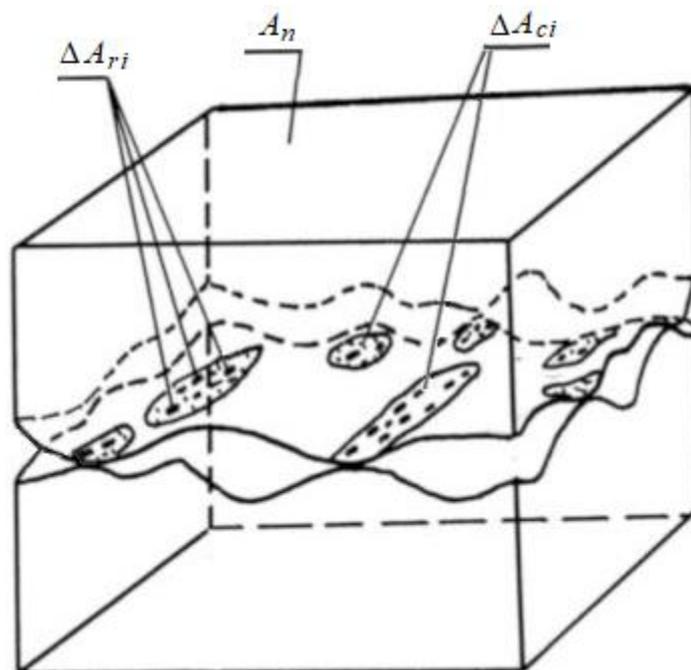


Рис. 5.1. Три площади контакта технических поверхностей:
 A_n – номинальная; $A_c = \sum \Delta A_{ci}$ – контурная; $A_r = \sum \Delta A_{ri}$ – фактическая

Надо заметить, что понятия фактической, контурной и номинальной площадей контакта сложились еще до появления технических средств, позволяющих обнаружить субшероховатость и измерить ее параметры. О наличии субшероховатости и ее влиянии на процессы контактирования технических поверхностей можно было только догадываться. В настоящее время к числу перечисленных выше площадей контакта следует добавить четвертую площадь, образованную ансамблем малых площадок контакта единичных неровностей субшероховатости. Однако официального общепринятого термина, обозначающего эту площадь контакта, пока нет.

Представление о контакте технических поверхностей как об ансамбле отдельных пятен контакта, образовавшихся в результате деформации неровностей под действием приложенной нагрузки, лежит в основе большинства аналитических моделей процессов контактного взаимодействия. Исторически одной из первых таких успешных моделей является модель И.В. Крагельского и Н.Б. Демкина [1–3].

5.2. Модель дискретного контакта технических поверхностей Крагельского – Демкина

Модель схематически поясняется рис. 5.2. На нем изображен контакт шероховатой поверхности с гладкой. Этот случай проще для первоначального знакомства с моделью, чем контакт двух шероховатых поверхностей. Вертикальную координату удобнее отсчитывать от линии выступов (линия 0–0 на рис. 5.2), которая проходит через вершину самого высокого выступа. Именно с того момента, когда деформирующая плоскость займет это положение, т.е. коснется вершины самого высокого выступа, можно считать поверхности вступившими в контакт. Обозначим вертикальную координату через Y , чтобы не путать ее с вертикальной координатой Z по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 (см. разд. 3.3).

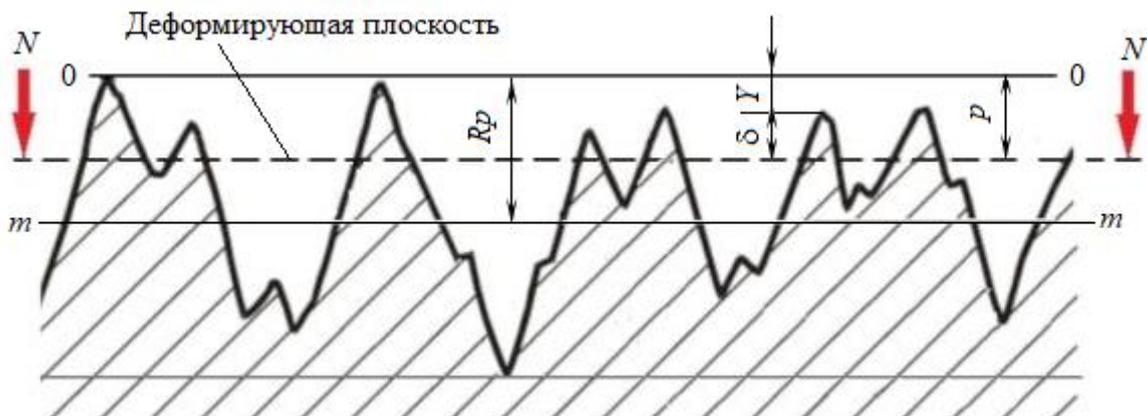


Рис. 5.2. Схема контакта шероховатой поверхности с гладкой плоскостью

В рассматриваемой модели используются три функции распределения:

1. Функция распределения материала по высоте шероховатого слоя (опорная кривая) (см. разд. 3.4):

$$t_p = \frac{A_p}{A_n} = t_m \left(\frac{p}{R_p} \right)^v. \quad (5.1)$$

2. Функция распределения материала по высоте единичного выступа (функция формы выступа):

$$\Delta A_p = \psi(\delta), \quad (5.2)$$

где ΔA_p – площадь сечения единичного выступа плоскостью, параллельной средней и находящейся от вершины выступа на расстоянии δ (см. рис. 5.2). При контактировании шероховатой поверхности с

гладкой плоскостью величина δ равна деформации выступа. Для сферического выступа (рис. 5.3) $\Delta A_{pi} = \pi r_i^2 \approx \alpha 2\pi r \delta_i$, где α – коэффициент упругой осадки выступов; r – средний радиус кривизны вершин выступов. Для упругого контакта $\alpha = 1/2$, для пластического – $\alpha = 1$, для упругопластического – $1/2 < \alpha < 1$. Аналогично $\Delta A_{mi} = \pi a_i^2 \approx \alpha 2\pi r Z_i$, где ΔA_{mi} – площадь сечения выступа на уровне средней плоскости. Таким образом, $\psi(\delta) = \alpha 2\pi r \delta$.

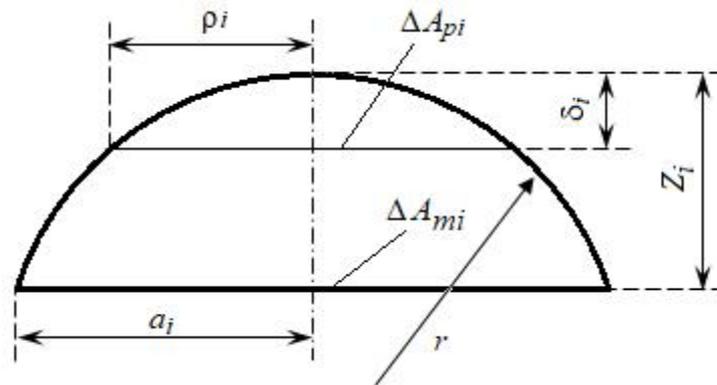


Рис. 5.3. Схема деформации сферического выступа

3. Функция распределения вершин выступов по высоте шероховатого слоя

$$\varphi(y) = \frac{dn_r}{n_m dy}. \quad (5.3)$$

где безразмерная координата $y = Y/R_p$; n_r и n_m – число контактирующих выступов и число выступов выше средней плоскости соответственно.

В качестве функции $\varphi(y)$ принята простейшая степенная функция $\varphi(y) = Cy^\gamma$. Из условия нормировки $\int_0^1 \varphi(y) dy = C \int_0^1 y^\gamma dy = 1$ следует, что $C = \gamma + 1$. В модели Н.Б. Демкина $\gamma = \nu - 2$, где ν – показатель степени в уравнении (5.1) опорной кривой. Окончательно $\varphi(y) = (\nu - 1)y^{\nu-2}$.

Очевидно, что из трех функций распределения независимы только две, третья может быть выражена через две заданные. Например, выразим относительную фактическую площадь контакта через функцию формы выступа (см. формулу (5.2)) и функцию распределения выступов по высоте (см. формулу (5.3)). Очевидно, что

$$A_p = \int_{n_r} \Delta A_p dn_r.$$

Из уравнения (5.2) и рис. 5.2 получаем $\Delta A_p = 2\pi r \delta = 2\pi r(p - Y) = 2\pi r R_p(\varepsilon - y)$, где $\varepsilon = p/R_p$. Выразив из уравнения (5.3) величину $dn_r = n_m(v - 1)y^{v-2}dy$, имеем:

$$A_p = 2\pi r R_p n_m (v - 1) \int_0^\varepsilon (\varepsilon - y) y^{v-2} dy.$$

Полученное уравнение приведем к виду

$$A_p = 2\pi r R_p n_m (v - 1) \varepsilon^v \int_0^1 \left(1 - \frac{y}{\varepsilon}\right) \left(\frac{y}{\varepsilon}\right)^{v-2} d\left(\frac{y}{\varepsilon}\right).$$

Интеграл в правой части уравнения $J = \int_0^1 (1 - x)x^{v-2} dx = \frac{1}{v(v-1)}$, поэтому окончательно имеем

$$A_p = 2\pi r \left(\frac{R_p}{v}\right) n_m \varepsilon^v. \quad (5.4)$$

Величина R_p/v равна средней высоте выступов Z_{cp} ¹. Тогда произведение $2\pi r \left(\frac{R_p}{v}\right) n_m = 2\pi r Z_{cp} n_m = \Delta A_{mcp} n_m = A_m$, где $A_m = t_m A_n$ – суммарная площадь сечения всех выступов на уровне средней плоскости. Окончательно на основании уравнения (5.4) получим

$$t_p = \frac{A_p}{A_n} = t_m \left(\frac{p}{R_p}\right)^v,$$

что совпадает с уравнением опорной кривой (5.1).

5.2.1. Расчет характеристик пластического контакта

Рассмотрим расчет характеристик контакта с помощью модели Н.Б. Демкина. Начнем с самого простого случая – пластического контакта. Нагрузку на единичный выступ можно записать в виде

$$N_i = p_r \Delta A_{ri},$$

где p_r – среднее контактное давление; ΔA_{ri} – площадь контакта i -го выступа. При пластическом контакте эта величина совпадает с площадью сечения i -го выступа $\Delta A_{ri} = \Delta A_{pi}$ (изменением формы выступа

¹ Из рис. 5.2 и 5.3 следует, что $Z_{cp} = R_p - Y_{cp} = R_p(1 - y_{cp})$. По определению $y_{cp} = \int_0^1 y \varphi(y) dy = 1 - \frac{1}{v}$, откуда $Z_{cp} = R_p/v$.

при его пластической деформации пренебрегаем). При пластическом контакте среднее контактное давление принимают равным микротвердости материала (см. разд. 2.5): $p_r = H$. На основании уравнения (5.2) для сферической модели выступа имеем $\Delta A_{ri} = 2\pi r \delta_i = 2\pi r(p - Y)$ (см. рис. 5.2). Суммарную нагрузку на контакт можно найти суммированием нагрузок на отдельные выступы:

$$N = \int_0^{n_r} N_i dn_r = \int_0^\varepsilon p_r 2\pi r R_p (\varepsilon - y) n_m (v - 1) y^{v-2} dy.$$

Вынося постоянные величины из-под знака интеграла и учитывая, что $2\pi r \left(\frac{R_p}{v}\right) n_m = A_m = t_m A_n$, получим

$$N = H t_m A_n v (v - 1) \varepsilon \int_0^1 (1 - x) x^{v-2} dx,$$

где $x = y/\varepsilon$. Выполнив интегрирование, получим

$$N = H t_m A_n \varepsilon^v. \quad (5.5)$$

Выразив относительную деформацию контакта (относительное сближение) ε из уравнения (5.5), получим

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{t_m H A_n}\right)^{\frac{1}{v}} = \left(\frac{p_n}{t_m H}\right)^{\frac{1}{v}}, \quad (5.6)$$

где $p_n = N/A_n$ – номинальное давление.

Таким образом, зная характеристики микрогеометрии контактирующих поверхностей (параметры опорной кривой t_m , v) и механические свойства материала (микротвердость H), можно рассчитать деформацию контакта (сближение контактирующих поверхностей под действием приложенной нагрузки).

Относительную фактическую площадь контакта найдем из уравнения опорной кривой (5.1), помня, что опорные кривые профиля и поверхности совпадают:

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_n} = t_m \varepsilon^v = \frac{p_n}{H}. \quad (5.7)$$

Из уравнения (5.7) следует, что фактическое контактное давление при пластическом контакте равно твердости (микротвердости) материала:

$$p_r = \frac{N}{A_r} = \frac{p_n A_n}{A_r} = H.$$

5.2.2. Расчет характеристик упругого контакта

Рассмотрим более сложный случай упругого контакта.

Среднее контактное давление (см. табл. 4.1) можно представить в виде $p_r = \frac{4}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{\delta}{r}}$. Тогда нагрузка на единичный выступ

$$N_i = p_r \Delta A_{ri} = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E^*}{\sqrt{r}} (p - Y)^{\frac{1}{2}} \pi r (p - Y) = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} (p - Y)^{\frac{3}{2}}. \quad (5.8)$$

Распределение выступов по высоте описывается той же функцией, что и при пластическом контакте:

$$dn_r = n_m (\nu - 1) y^{\nu-2} dy.$$

Подставив значения N_i и dn_r в уравнение (5.8), получим:

$$N = \int_0^\varepsilon \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} R_p^{\frac{3}{2}} n_m (\nu - 1) (\varepsilon - y)^{\frac{3}{2}} y^{\nu-2} dy.$$

После преобразований имеем

$$N = \frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\pi r \left(\frac{R_p}{\nu}\right) n_m \right] \nu (\nu - 1) \varepsilon^{\nu+\frac{1}{2}} J_\nu,$$

где $J_\nu = \int_0^1 x^{\nu-2} (1-x)^{\frac{3}{2}} dx$; $x = y/\varepsilon$.

Выражение в квадратных скобках равно половине суммарной площади сечения выступов на уровне средней плоскости $A_m = 2\pi r Z_{cp} n_m$, где $Z_{cp} = R_p/\nu$ (см. сноску¹ на стр. 87).. В свою очередь, $A_m = t_m A_n$.

Интеграл J_ν представляет собой бета-функцию $B\left(\frac{5}{2}; \nu - 1\right)$. Обозначив комбинацию $\nu(\nu - 1)B\left(\frac{5}{2}; \nu - 1\right) = K_1$, запишем выражение для нагрузки на контакт:

$$N = \frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \alpha t_m A_n K_1 \varepsilon^{\nu+\frac{1}{2}},$$

где для упругого контакта $\alpha = 0,5$.

Обозначив комбинацию $\frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r}\right)^{\frac{1}{2}} = \Omega$, получим

$$N = \alpha A_n t_m \Omega K_1 \varepsilon^{\nu+\frac{1}{2}}.$$

Выразим отсюда относительную деформацию:

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{\alpha A_n t_m \Omega K_1} \right)^{\frac{1}{v+2}} = \left(\frac{p_n}{\alpha t_m \Omega K_1} \right)^{\frac{1}{v+2}}. \quad (5.9)$$

Значения коэффициента K_1 приведены на рис. 5.4.

Относительную фактическую площадь контакта $\eta_r = A_r/A_n$ найдем, подставив значение ε из формулы (5.9) в уравнение опорной кривой (5.1), учитывая, что при упругом контакте² $\eta_r = \alpha t_p$:

$$\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^v = \left[(\alpha t_m)^{\frac{1}{2v}} \cdot \frac{p_n}{\Omega K_1} \right]^{\frac{2v}{2v+1}}. \quad (5.10)$$

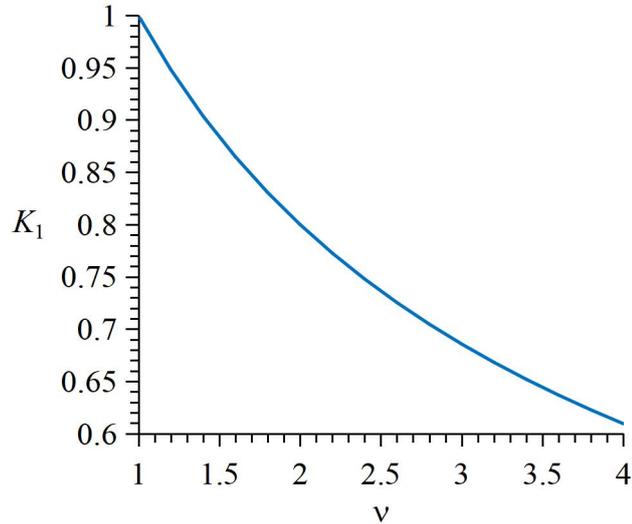


Рис. 5.4. Значения коэффициента K_1

Среднее фактическое давление в упругом контакте шероховатой поверхности с гладкой плоскостью найдем из очевидного соотношения $\frac{p_r}{p_n} = \frac{A_n}{A_r} = \frac{1}{\eta_r}$:

$$p_r = (\Omega K_1)^{\frac{2v}{2v+1}} \cdot \left(\frac{p_n}{\alpha t_m} \right)^{\frac{1}{2v+1}}. \quad (5.11)$$

² При упругом контакте по теории Герца площадь контакта единичного выступа $\Delta A_{ri} = \pi r \delta_i$, тогда как геометрическая площадь сечения выступа (см. рис. 5.3) $\Delta A_{si} = 2\pi r \delta_i$. Отсюда $\eta_r = \frac{A_r}{A_n} = \frac{\sum \Delta A_{ri}}{A_n} = \alpha t_p = \alpha \frac{\sum \Delta A_{si}}{A_n}$, где $\alpha = 0,5$.

В формуле (5.11) комплекс Ω и коэффициент K_1 – постоянные величины для данного контакта, а второй сомножитель слабо зависит от нагрузки (номинального давления) – в степени $1/5$ – $1/7$. В результате при упругом контакте фактическое контактное давление слабо зависит от нагрузки (рис. 5.5): при изменении номинального давления на три порядка фактическое давление выросло менее чем в три раза. Подобный результат типичен для упругого контакта шероховатых поверхностей.

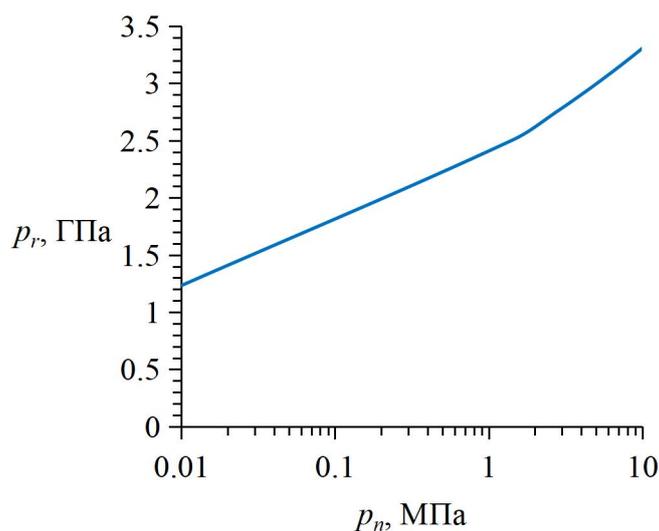


Рис. 5.5. Пример зависимости фактического контактного давления от номинального при упругом контакте: поверхности стальные; $R_p/r = 0,05$, $\nu = 3$, $\alpha = 0,5$, $t_m = 0,5$

При пластическом контакте, как показано выше, фактическое контактное давление – величина постоянная, равная твердости (микротвердости) материала.

Для перехода от контакта шероховатой поверхности с гладкой плоскостью к контакту двух шероховатых поверхностей используют понятие *эквивалентной шероховатости* [4]. Под этим понятием подразумевается шероховатость такой поверхности, у которой функция распределения материала по высоте (опорная кривая) представляет собой композицию законов распределения материала первой и второй поверхностей. Для определения параметров эквивалентной шероховатости при контакте двух одинаковых поверхностей рекомендуются формулы [4]:

$$\nu_{1,2} = 2\nu; \quad t_{m1,2} = 2^{2\nu} K_2 t_m^2; \quad R_{p1,2} = 2Rp.$$

Коэффициент K_2 вычисляется по формуле $K_2 = \frac{\nu I^2(\nu)}{2\Gamma(2\nu)}$. Его значения приведены на рис. 5.6.

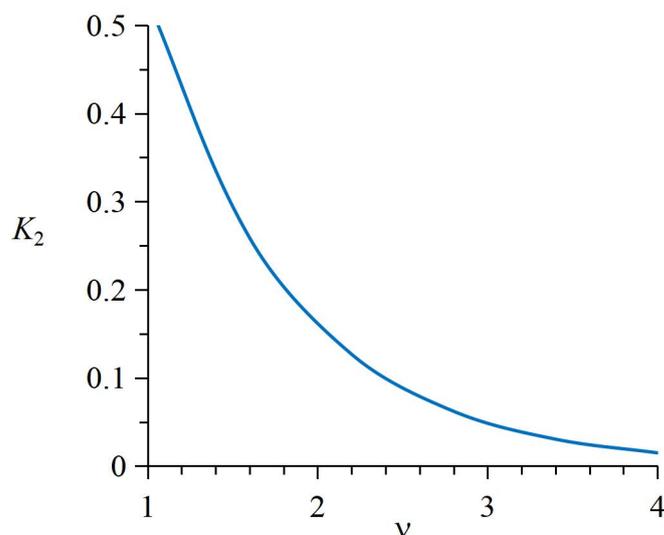


Рис. 5.6. Значения коэффициента K_2

5.3. Модель дискретного контакта технических поверхностей Гринвуда – Вильямсона

Другая известная модель дискретного контакта технических поверхностей предложена Дж. Гринвудом (*J.A. Greenwood*) и Дж. Вильямсоном (*J.B.P. Williamson*) [5]. В их модели рассматривается также контакт шероховатой поверхности с гладкой (см. рис. 5.2). В отличие от модели Крагельского – Демкина, отсчет вертикальной координаты в данной модели ведется от средней линии, а не от линии выступов. Вслед за авторами модели будем обозначать эту координату буквой Z . Положение деформирующей плоскости определяется величиной контактного зазора $d = R_p - p$, которая также отсчитывается от средней линии.

Исходные предпосылки фактически те же, что и в модели Крагельского – Демкина, с той разницей, что считается известной функция плотности вероятности распределения вершин выступов $\varphi'(Z)$. Эта функция либо постулируется, либо определяется экспериментально. Первоначально авторы модели исходили из нормального закона, хотя это необязательно.

Рассмотрим упругий контакт поверхностей. Аналогично модели Крагельского – Демкина, площадь единичного контакта $\Delta A_{ri} = \pi r(Z - d)$, фактическое давление в контакте единичного выступа $p_{ri} = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E^*}{\sqrt{r}} (Z - d)^{\frac{1}{2}}$. Тогда уравнение для расчета контактной нагрузки запишем в виде

$$N = \int_d^\infty N_i dn_r = \int_d^\infty p_n \Delta A_{ri} dn_r = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E^*}{\sqrt{r}} \int_d^\infty (Z-d)^{\frac{1}{2}} \pi r (Z-d) n_m \varphi'(Z) dZ,$$
 где $dn_r = n_m \varphi'(Z) dZ$. После преобразований получим

$$N = \frac{4}{3} r^{\frac{1}{2}} E^* n_m \int_d^\infty (Z-d)^{\frac{3}{2}} \varphi'(Z) dZ.$$

Перейдя к безразмерным величинам $\zeta = Z/R_q$ и $h = d/R_q$, где R_q – среднеквадратичное отклонение профиля, и вводя поверхностную плотность выступов $D = \frac{n_m}{A_n}$, окончательно получим

$$p_n = \frac{N}{A_n} = \frac{4}{3} r^{\frac{1}{2}} E^* D R_q^{\frac{3}{2}} \int_h^\infty (\zeta - h)^{\frac{3}{2}} \varphi'_0(\zeta) d\zeta, \quad (5.12)$$

где $\varphi'_0(\zeta)$ – нормированная плотность вероятности.

Интегралы, подобные интегралу в уравнении (5.12), встречаются в формулах для расчета других характеристик контакта. Все они имеют схожий вид и обозначаются авторами модели как

$$F_n(h) = \int_h^\infty (\zeta - h)^n \varphi'_0(\zeta) d\zeta.$$

Для значений $n = 0; 1/2; 1; 3/2$ интегралы табулированы.

Аналогично можно вычислить фактическую площадь контакта:

$$A_r = \int \Delta A_{ri} dn_r = \int_d^\infty \pi r (Z-d) n_m \varphi'(Z) dZ = \pi r n_m \int_d^\infty (Z-d) \varphi'(Z) dZ,$$

или в безразмерной форме:

$$\eta = \frac{A_r}{A_n} = \pi r D R_q \int_h^\infty (\zeta - h) \varphi'_0(\zeta) d\zeta.$$

Уравнения

$$\eta = \pi r D R_q F_1(h);$$

$$p_n = \frac{4}{3} r^{\frac{1}{2}} E^* D R_q^{\frac{3}{2}} F_{\frac{3}{2}}(h)$$

в параметрической форме содержат связь между номинальным давлением и относительной фактической площадью контакта (параметром является величина $h = d/R_q$).

5.4. «Упругая твердость» дискретного контакта технических поверхностей

Используя типичные значения параметров опорной кривой $t_m \approx 0,5$ и $\nu = 2-3$, уравнение (5.11) можно записать в виде

$$p_r = K_D E^* \left(\frac{R_p}{r}\right)^{m_1} \left(\frac{p_n}{E^*}\right)^{m_2}, \quad (5.13)$$

где $K_D = 0,45-0,50$; $m_1 = 0,40-0,43$; $m_2 = 0,1-0,2$.

Слабая зависимость фактического контактного давления p_r от номинального давления p_n (см. разд. 5.2.2) дает основание в некотором ограниченном диапазоне изменения p_n пренебречь ею и считать фактическое контактное давление при упругом контакте постоянным, как и при пластическом контакте. Воплощением такого подхода является концепция «упругой твердости» [5]. Согласно [5], упругая твердость, названная так по аналогии с пластическим контактом, выражается формулой

$$p_r \approx K_{GW} E^* \sqrt{\frac{R_q}{r}}, \quad (5.14)$$

где $K_{GW} = 0,2-0,4$ – коэффициент.

В работе [6] на основе наиболее гибкого бета-распределения высот и радиусов вершин выступов получено выражение для фактического контактного давления дискретного упругого контакта (упругой твердости) в виде

$$p_r \approx K_{IK} E^* \sqrt{\frac{R_a}{r}}, \quad (5.15)$$

где $K_{IK} = 0,25-0,60$ – коэффициент; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатой поверхности. Формулы (5.14) и (5.15) отличаются лишь коэффициентами, так как параметры R_a и R_q связаны между собой соотношением $R_q = 1,25R_a$.

5.5. Критерии перехода от упругого контакта шероховатых поверхностей к пластическому

Очевидно, что при достаточно малых нагрузках контакт шероховатых поверхностей должен быть упругим, а при достаточно больших – пластическим.

Как показано выше, фактическое контактное давление при пластическом контакте равно твердости (микротвердости) материала контактирующих деталей H , а при упругом – с точностью до постоянного коэффициента величине $E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}}$. Из этих характеристик можно составить безразмерный критерий $\frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{R_p}{r}}$. Вместо статистически нестабильной характеристики шероховатости R_p целесообразно использовать пропорциональную ей более стабильную величину R_a : $\Psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{R_a}{r}}$.

Величина критерия Ψ , которую авторы рассмотренной выше модели Гринвуд и Вильямсон назвали индексом пластичности³ [5], определяет преобладающий характер деформации контакта – упругий или пластический (рис. 5.7).

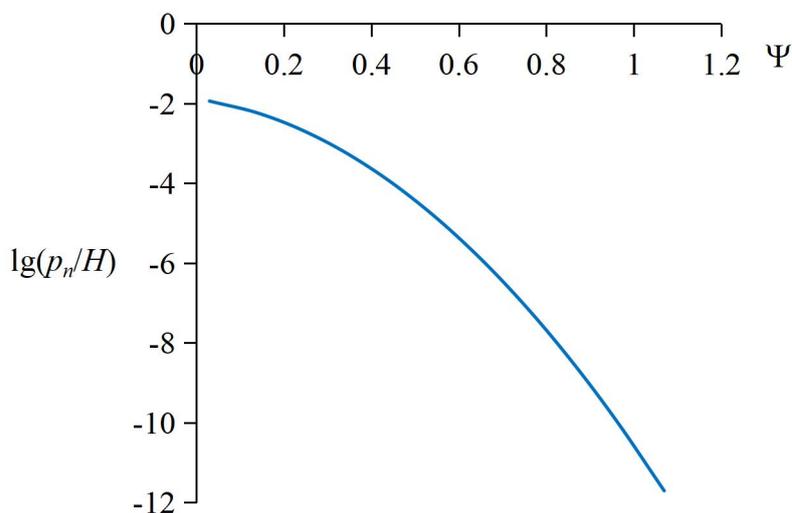


Рис. 5.7. Карта механизмов деформации контакта шероховатых поверхностей [7]: область выше сплошной линии – пластический контакт; ниже – упругий

5.6. Пластический контакт при больших номинальных давлениях

Выражения (5.6) и (5.7) для расчета характеристик пластического контакта шероховатых поверхностей справедливы при условии независимой деформации выступов шероховатости. При больших номинальных контактных давлениях начинает проявляться взаимное влияние соседних выступов на их деформацию. Это приводит к тому, что фактическое контактное давление перестает быть постоянным, равным твердости, и начинает увеличиваться с ростом номинального давления.

³ В оригинале [5] вместо величины R_a используется среднеквадратичное отклонение профиля R_q .

Пропорциональность фактической площади контакта номинальному контактному давлению, выражаемая уравнением (5.7), также нарушается, и зависимость относительной фактической площади контакта от относительного номинального давления становится нелинейной (рис. 5.8).

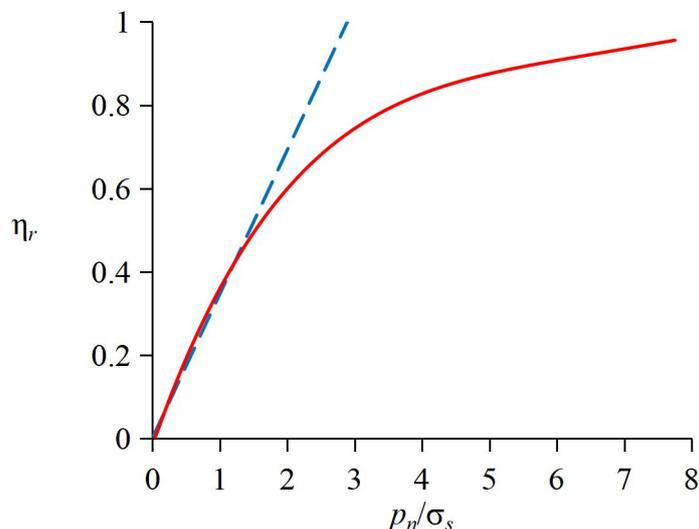


Рис. 5.8. Зависимость относительной площади фактического контакта от относительного номинального контактного давления: сплошная линия – с учетом взаимного влияния деформации выступов шероховатости; пунктирная – зависимость $\eta_r(p_n)$ по уравнению (5.7); σ_s – предел текучести при растяжении (сжатии)

Рис. 5.9 наглядно иллюстрирует изменение фактического контактного давления в процессе деформации шероховатого слоя. Пока относительная площадь контакта невелика, фактическое контактное давление остается постоянным: $p_r \approx 3\sigma_s \approx H$. С некоторого момента фактическое контактное давление по мере увеличения фактической площади контакта начинает расти (теоретически до бесконечности).

В реальности необходимо иметь в виду, что зависимости, показанные на рис. 5.8 и 5.9, наблюдаются только в случае стесненной деформации, если контактирующие детали лишены возможности пластического формоизменения. В противном случае возможна ситуация, показанная на рис. 5.10: деталь с шероховатой поверхностью под действием деформирующего штампа сама начинает пластически деформироваться при отсутствии деформации шероховатости. Это произойдет при $p_n = \frac{N}{\pi D^2} = \sigma_s$. Как видно из рис. 5.8, данная ситуация соответствует относительной фактической площади контакта $\eta_r \approx 0,35$.

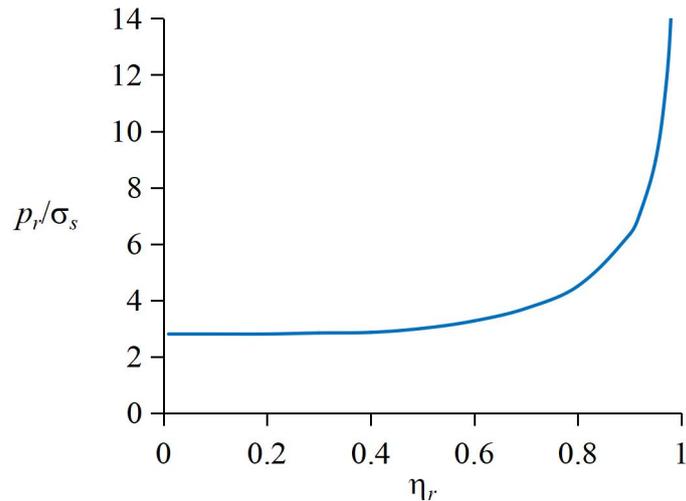


Рис. 5.9. Зависимость относительного фактического контактного давления от относительной фактической площади контакта

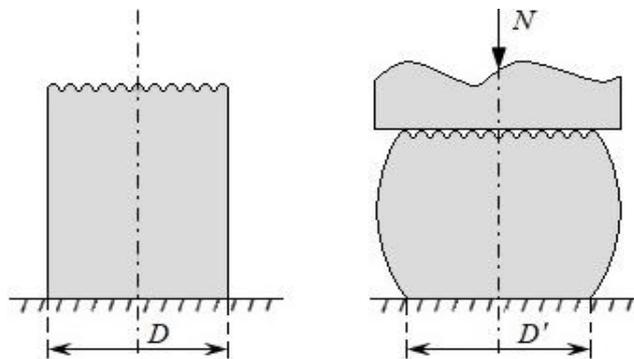


Рис. 5.10. Смятие шероховатого цилиндра гладким штампом: D – исходный диаметр; D' – диаметр деформированного цилиндра

5.7. Дискретный контакт с адгезией

Классические модели дискретного контакта технических поверхностей [1, 5] не учитывали влияния адгезионного взаимодействия контактирующих тел, несмотря на то, что теоретическое описание адгезионного контакта гладких тел правильной геометрической формы разработано достаточно давно [8, 9]. Эти теории известны как теория Джонсона – Кендалла – Робертса [8] (ДКР, или *JKR* в латинской транскрипции, 1971 год) и теория Дерягина – Муллера – Топорова [9] (ДМТ, или *DMT*, 1975 год). И хотя позднее появились работы, развивающие и уточняющие теории ДКР и ДМТ, они не утратили актуальности до настоящего времени, широко цитируются и используются в современных теоретических моделях контактного взаимодействия.

Суть данных моделей в сравнении с классической моделью Г. Герца для упругого контакта с первоначальным касанием в точке иллюстрируется рис. 5.11 и 5.12. На рис. 5.11 схематически показаны зависимости

сил взаимодействия атомов (молекул) контактирующих поверхностей от расстояния между ними. Рис. 5.11а качественно соответствует взаимодействию реальных поверхностей. На расстоянии z_0 сила взаимодействия отсутствует, при расстояниях $r < z_0$ действуют силы отталкивания, при $r > z_0$ – силы притяжения. Площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой $F(r)$, соответствует работе сил адгезии $\Delta\gamma$.

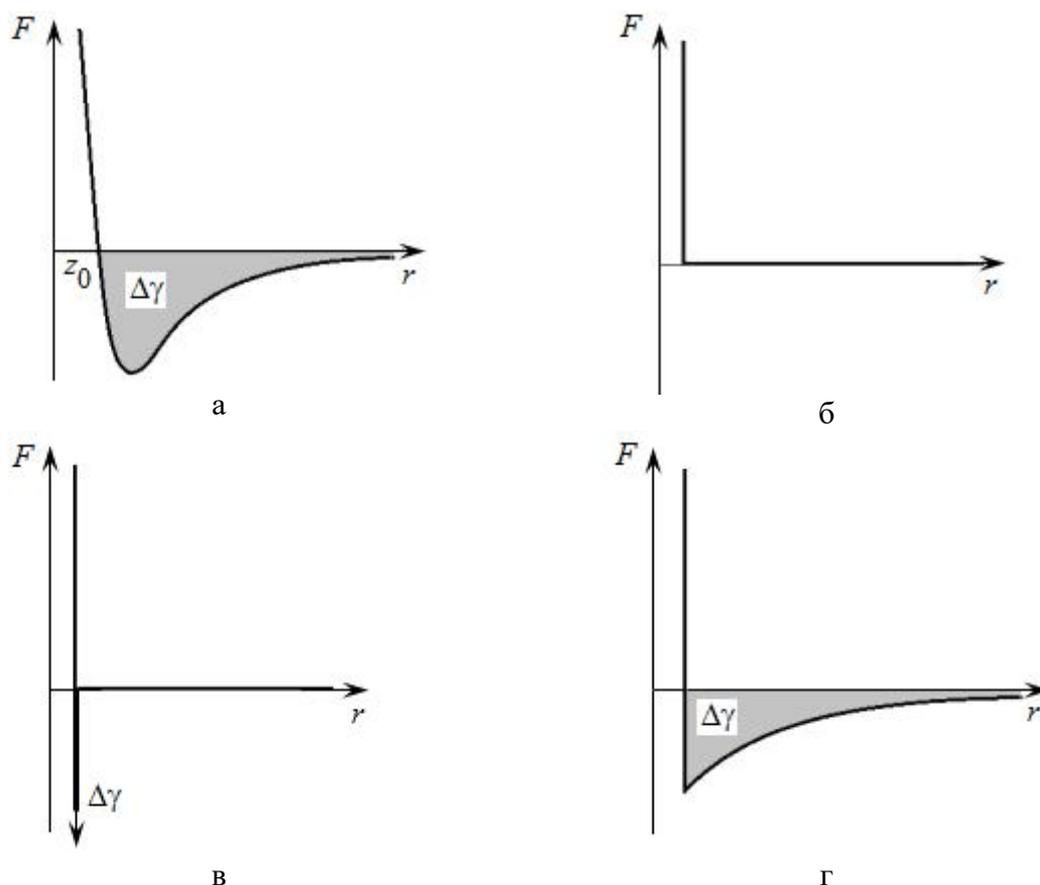


Рис. 5.11. Характер зависимости сил взаимодействия атомов (молекул) контактирующих поверхностей от расстояния между ними по различным моделям: а – реальный контакт; б – модель Герца; в – модель JKR ; г – модель DMT ; $\Delta\gamma$ – работа сил адгезии; z_0 – равновесное расстояние; $F(z_0) = 0$

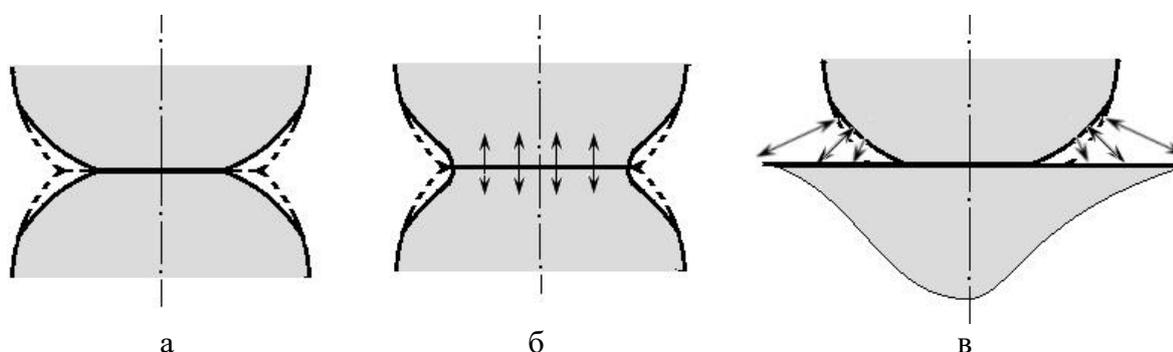


Рис. 5.12. Модели единичного адгезионного контакта: а – Герца; б – JKR ; в – DMT

В модели Г. Герца для упругого контакта двух тел, ограниченных поверхностями второго порядка, силы притяжения отсутствуют (см. рис. 5.11б). Соответствующая схема контакта показана на рис. 5.12а. Площадь контакта в два раза меньше площади геометрического сечения контактирующих тел при том же сближении (см. пунктир на рис. 5.12а).

В модели *JKR* силы притяжения действуют только на площадке непосредственного соприкосновения тел, т.е. фактически при $r = z_0$ (см. рис. 5.11в). Зависимость $F(r)$ представляет собой δ -функцию, интеграл от которой равен работе сил адгезии $\Delta\gamma$. Схема контакта представлена на рис. 5.12б. Площадь контакта отличается от герцевской в большую сторону.

В модели *DMT* силы притяжения действуют на расстояниях $r > z_0$ (см. рис. 5.11г). Схема контакта представлена на рис. 5.12в. Площадь контакта равна герцевской.

Области применимости указанных моделей адгезионного взаимодействия, вытекающие из их исходных предпосылок, представлены в таблице.

Характеристики моделей адгезионного взаимодействия [10, 11]

Модель контакта	Исходные предпосылки	Область применимости и другие особенности
Модель Герца (см. рис. 5.11б)	Силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия не учитываются	Большие контактные нагрузки, когда адгезионным взаимодействием можно пренебречь
Модель Джонсона – Кендалла – Робертса (<i>JKR</i>) (см. рис. 5.11в)	Короткодействующие силы притяжения. Действуют только в зоне непосредственного соприкосновения поверхностей	Сильная адгезия. Относительно большие радиусы кривизны контактирующих тел, малая жесткость (например, полимеры). Заниженные расчетные величины контактной нагрузки
Модель Дерягина – Муллера – Топорова (<i>DMT</i>) (см. рис. 5.11г)	Дальнодействующие силы притяжения. Действуют за пределами площадки контакта	Слабая адгезия. Относительно малые радиусы кривизны контактирующих тел, большая жесткость (например, металлы). Заниженные расчетные величины площади контакта

Обобщение моделей адгезионного взаимодействия неровностей контактирующих поверхностей Дерягина – Муллера – Топорова и Джонсона – Кендалла – Робертса с помощью модели дискретного контакта Крагельского – Демкина (см. разд. 5.2) позволяет получить описанные ниже результаты [12].

DMT-модель приводит к следующим зависимостям для расчета характеристик дискретного контакта.

Относительная деформация контакта связана с номинальным контактным давлением зависимостью

$$p_n = t_m \left(\frac{2K_3}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}} \cdot \varepsilon^{v+\frac{1}{2}} - \frac{v\Delta\gamma}{R_p} \varepsilon^{v-1} \right), \quad (5.16)$$

где $K_1 = v(v-1)B\left(\frac{5}{2}; v-1\right)$ (см. разд. 5.2.2). Величины коэффициента K_1 приведены на рис. 5.13. Остальные обозначения прежние.

Относительная фактическая площадь контакта связана с относительной деформацией уравнением опорной кривой $\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^v$, поскольку в DMT-модели площадь контакта герцевская.

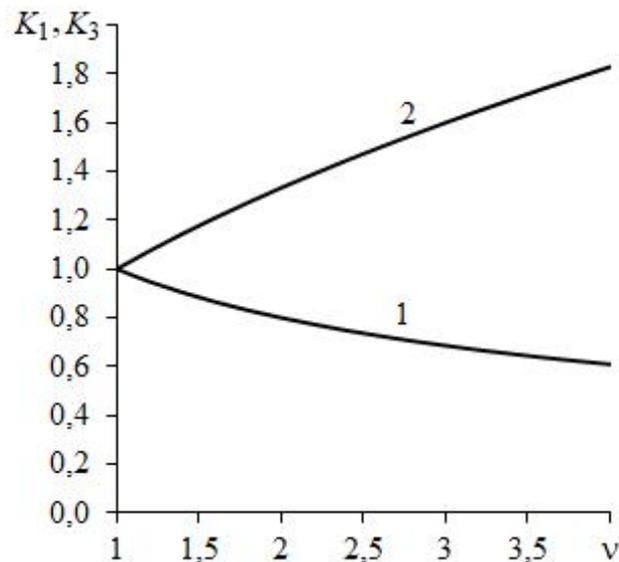


Рис. 5.13. Значения коэффициентов: 1 – K_1 ; 2 – K_3

Характерный пример зависимости основных характеристик контакта от номинального давления для DMT-модели приведен на рис. 5.14. Расчет характеристик выполнен для параметров микрогеометрии поверхности стальных концевых мер длины (так называемой плитки Иогансона), имеющих очень малую шероховатость.

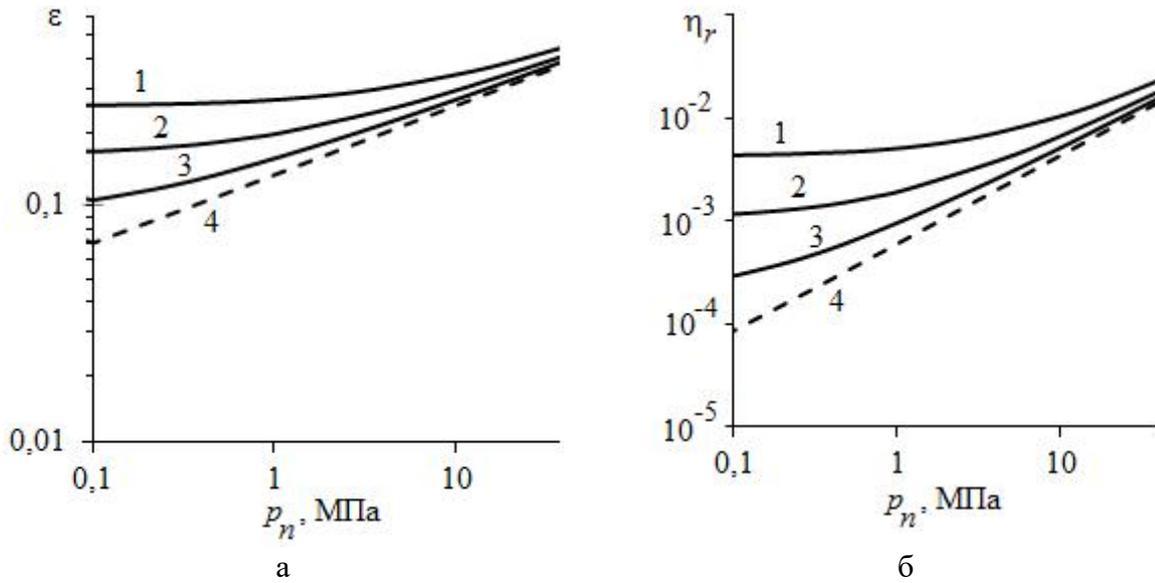


Рис. 5.14. Влияние адгезионных сил: а – на относительную деформацию контакта ε ; б – относительную площадь фактического контакта η_r по *DMT*-модели; 1 – энергия адгезии $\Delta\gamma = 0,5$ Дж/м²; 2 – $\Delta\gamma = 0,25$ Дж/м²; 3 – $\Delta\gamma = 0,1$ Дж/м²; 4 – $\Delta\gamma = 0$ (контакт по Герцу)

***JKR*-модель** приводит к следующим зависимостям для расчета основных характеристик дискретного контакта.

Относительная деформация контакта связана с номинальным контактным давлением зависимостью

$$p_n = t_m \left(\frac{2K_1}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}} \varepsilon^{\nu+1/2} - \frac{\nu\Delta\gamma}{\sqrt{3} R_p} \varepsilon^{\nu-1} \right), \quad (5.17)$$

практически совпадающей с аналогичной зависимостью в *DMT*-модели (см. уравнение (5.16)).

Относительная фактическая площадь контакта связана с относительной деформацией более сложной зависимостью, чем в *DMT*-модели, так как площадь контакта сферических вершин выступов отлична от герцевской:

$$\eta_r = 0,5t_m\varepsilon^\nu \left[1 + 0,7K_3 \left(\frac{\Delta\gamma}{E^*R_p} \right)^{1/3} \left(\frac{r}{R_p} \right)^{1/6} \varepsilon^{-1/2} + 3\nu \left(\frac{\Delta\gamma}{E^*R_p} \right)^{2/3} \left(\frac{r}{R_p} \right)^{1/3} \varepsilon^{-1} \right], \quad (5.18)$$

где $K_3 = \nu(\nu - 1)B\left(\frac{3}{2}; \nu - 1\right)$ – коэффициент, значения которого приведены на рис. 5.13.

Очевидно, что при отсутствии адгезии ($\Delta\gamma = 0$) формула (5.18) описывает деформационную кривую опорной поверхности для герцевского контакта шероховатых тел $\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^\nu$, о которой говорилось выше.

Характерный пример зависимости основных характеристик контакта от номинального давления для *JKR*-модели приведен на рис. 5.15.

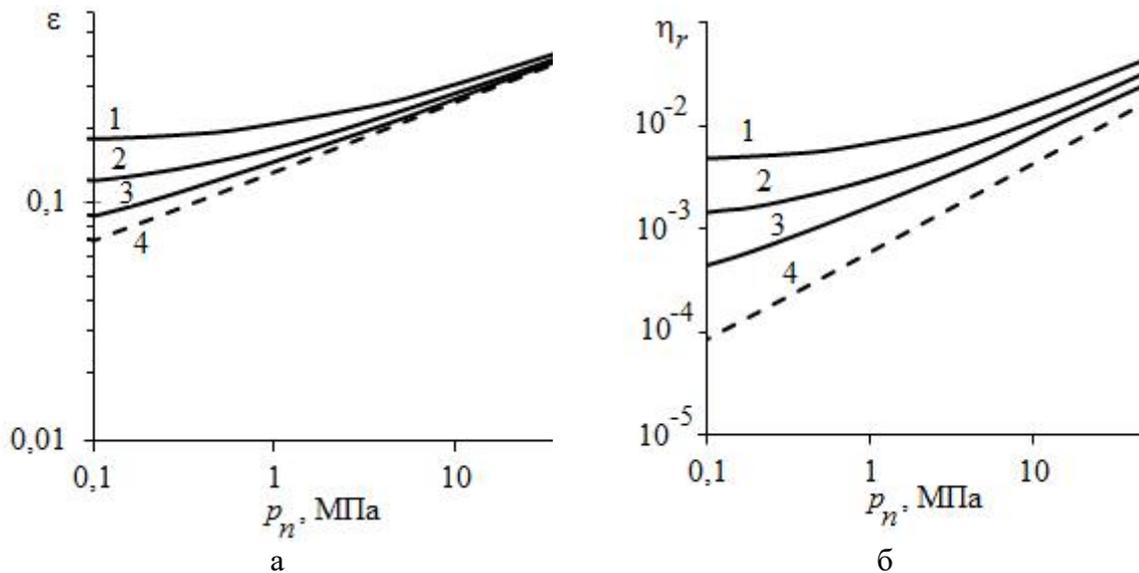


Рис. 5.15. Влияние адгезионных сил: а – на относительную деформацию контакта ε ; б – относительную площадь фактического контакта η_r по теории *JKR*;
 1 – энергия адгезии $\Delta\gamma = 0,5$ Дж/м²; 2 – $\Delta\gamma = 0,25$ Дж/м²;
 3 – $\Delta\gamma = 0,1$ Дж/м²; 4 – $\Delta\gamma = 0$ (контакт по Герцу)

Качественный характер зависимостей основных характеристик дискретного контакта от номинального давления по *DMT*- и *JKR*-моделям аналогичен (рис. 5.14 и 5.15). При малых значениях внешнего контактного давления p_n (и даже при его отсутствии) величины деформации и площади контакта существенно превышают герцевские значения из-за влияния адгезионных сил притяжения. По мере роста внешнего контактного давления роль адгезионных сил уменьшается и значения характеристик контакта все меньше отличаются от рассчитанных по классической модели дискретного контакта без учета влияния адгезии.

Влияние энергии адгезии на относительную деформацию и относительную площадь фактического контакта также очевидно: чем выше энергия адгезии, тем больше величина относительной площади контакта и относительной деформации при том же значении внешнего давления.

При отсутствии адгезионных сил ($\Delta\gamma = 0$) уравнения (5.16) и (5.17) принимают вид, совпадающий с формулой (5.9) зависимости относительной деформации контакта от номинального давления в модели Крагельского – Демкина для упругого контакта (см. разд. 5.2.2):

$$\varepsilon = \left(\frac{3\pi}{2K_1} \cdot \frac{p_n}{t_m E^* \sqrt{\frac{Rp}{r}}} \right)^{\frac{1}{\nu+2}}.$$

5.8. Критерий степени влияния адгезионных сил на процесс контактирования поверхностей

Из уравнений (5.16) и (5.17) следует, что даже при отсутствии внешней сжимающей силы ($p_n = 0$) деформация контакта $\varepsilon \neq 0$. Эта деформация (обозначим ее ε_0) – результат действия адгезионных сил. При $p_n = 0$ из уравнений (5.16) и (5.17) получаем

$$\varepsilon_0 \propto \left(\frac{\Delta\gamma}{E^*} \sqrt{\frac{r}{R_p^3}} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

Очевидно, что безразмерный комплекс

$$\Psi_{adh} = \left(\frac{\Delta\gamma}{E^* R_p} \cdot \sqrt{\frac{r}{R_p}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

может служить характеристикой влияния адгезионных сил на процесс контактирования поверхностей: чем больше величина Ψ_{adh} , тем больше деформация контакта (следовательно, и фактическая площадь контакта), обусловленная влиянием адгезии.

Что касается числовых значений критерия Ψ_{adh} , то при $\Psi_{adh} < 0,01$ относительная деформация контакта, вызванная адгезионными силами, менее 0,05. В этом случае будем считать, что влиянием адгезии можно пренебречь.

Расчеты показывают [12], что на микромасштабном уровне, когда характеристики контакта определяются деформацией выступов шероховатости, для большинства металлических поверхностей, обработанных стандартными технологическими методами, величина Ψ_{adh} лежит в диапазоне меньше критического значения 0,01 или близко к нему. Только для поверхностей с высокой чистотой обработки (например, полированной) и при достаточно большой энергии адгезии ($\Delta\gamma \sim 1$ Дж/м²) адгезионное взаимодействие может вносить определенный вклад в формирование площади контакта и его деформацию.

На наномасштабном уровне (субшероховатость) величина Ψ_{adh} достигает нескольких десятых, что на порядок больше критического значения. Это означает, что в расчетах характеристик дискретного контакта на наномасштабном уровне следует учитывать роль адгезионных сил.

Список литературы к главе 5

1. Kragelsky I.V., Demkin N.B. Contact area of rough surfaces // *Wear*. 1960. V. 3. Iss. 3. P. 170–187.
2. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: Издательство Академии наук СССР, 1962. 112 с.
3. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
5. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // *Proc. Roy. Soc.* 1966. V. A295. № 1442. P. 300–319.
6. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел // *Трение и износ*. 1983. Т. IV. № 6. С. 983–990.
7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
8. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // *Proc. Roy. Soc.* 1971 V. A324. № 1558. P. 301–313.
9. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1975. V. 53. P. 314–326.
10. Grierson D.S., Flater E.E., Carpick R.W. Accounting for the JKR-DMT transition in adhesion and friction measurements with atomic force microscopy // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2005. V. 19. № 3–5. P. 291–311.
11. Xinghua Shi, Ya-Pu Zhao. Comparison of various adhesion contact theories and the influence of dimensionless load parameter // *J. Adhesion Sci. Technol.* 2004. V. 18. № 1. P. 55–68.
12. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ

6.1. Виды трения в узлах машин

Принципиальной особенностью процесса трения является его диссипативный характер, т.е. трение всегда сопровождается переходом механической энергии в другие ее виды. Диссипация энергии при трении приводит к нагреванию поверхностей, их окислению, износу и прочим изменениям в зоне контакта.

По кинематическому признаку различают трение покоя, скольжения и качения. Силой трения покоя называют тангенциальную силу, прикладываемую к покоящимся телам и не вызывающую их скольжения. При трении скольжения сопряженные тела имеют разные скорости в точках (точнее, на площадках) контакта (рис. 6.1).

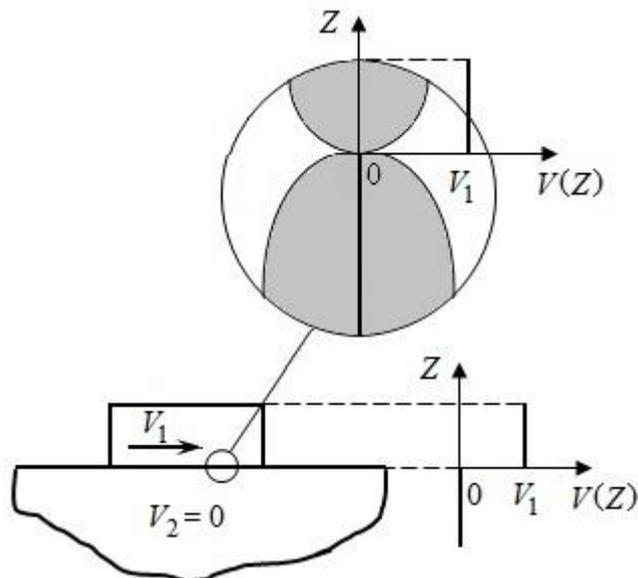


Рис. 6.1. Схема контакта двух тел и двух отдельных выступов шероховатости (увеличено) при трении скольжения, а также соответствующие эпюры скоростей $V(Z)$ (на границе раздела контактирующих тел наблюдается разрыв функции $V(Z)$)

При трении качения без проскальзывания скорости сопряженных тел в точках (площадках) контакта одинаковы, так что их относительная скорость равна нулю (рис. 6.2). Иногда оба вида трения проявляются совместно, тогда качение сопровождается проскальзыванием.

В зависимости от наличия смазочного материала и характера его участия в процессе трения различают трение без смазочного материала (сухое) и со смазочным материалом: граничное (при граничной смазке) и жидкостное (газовое).

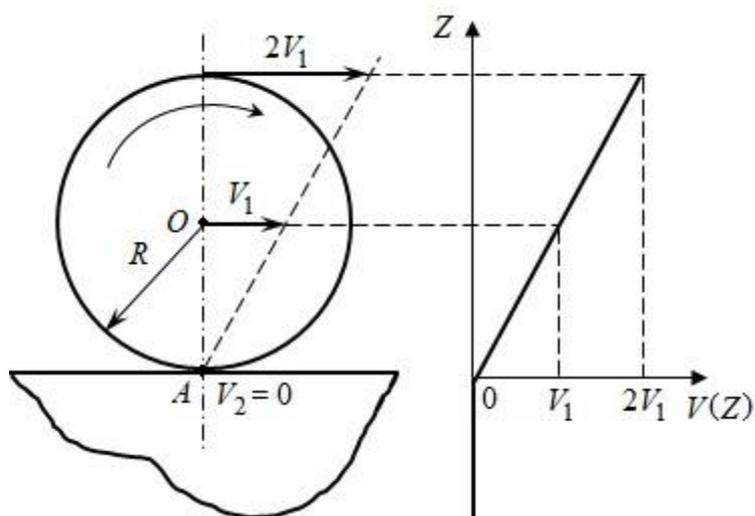


Рис. 6.2. Схема контакта двух тел при трении качения и эпюра скоростей $V(Z)$ (в точке касания поверхностей (точка A – мгновенный центр вращения) скорости контактирующих тел одинаковы (в данном случае равны нулю))

Термин «сухое трение» нестандартный, но при этом весьма распространенный среди специалистов-трибологов. Сухим называют такое трение, когда в зоне контакта отсутствует специально введенный смазочный материал, контактирующие поверхности покрыты только окисными пленками и адсорбированными пленками воды и газа. Этот режим трения встречается в тормозах, фрикционных передачах, работающих всухую, в узлах машин текстильной, пищевой, химической промышленности, где смазка во избежание порчи продукции либо по соображениям безопасности недопустима.

Граничное трение возникает в том случае, когда поверхности трущихся тел разделены слоем смазочного материала малой толщины – порядка 0,1 мкм и меньше, вплоть до размера молекулы. Граничный слой из окислов, воды, адсорбированных газов, молекул углеводородов существенно уменьшает трение и износ. Особенно это относится к граничным слоям жирных кислот и других поверхностно-активных веществ. Жирные кислоты входят, в частности, в состав многих смазочных масел. Граничные слои весьма прочны и способны выдержать большие нагрузки без разрушения.

Жидкостное (газовое) трение характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем жидкости или газа, находящимся под давлением. Это давление уравнивает внешнюю нагрузку, причем сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости или газа, так как твердые тела не контактируют друг с другом в этом режиме.

В заключение приведем ориентировочные значения коэффициента трения для различных режимов трения (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Типичные значения коэффициента трения f

Вид трения	Режим трения	f
Скольжение	Сухое	0,1–1,0
	Граничное	0,05–0,2
	Жидкостное	0,002–0,01
	Газовое	0,000 5–0,000 1
Качение	Сухое	0,01–0,005
	Со смазкой	0,005–0,000 5

6.2. Трение покоя. Предварительное смещение

При попытке сдвинуть одно из контактирующих твердых тел относительно другого оно остается в относительном покое до тех пор, пока приложенная сила не достигнет некоторого критического значения $F_{\pi \max}$ (рис. 6.3). Сила $F_{\pi \max}$ называется максимальной силой трения покоя, а сила $0 < F_{\pi} < F_{\pi \max}$, не вызывающая относительного движения контактирующих тел, – просто силой трения покоя. При величине сдвигающей силы $F \geq F_{\pi \max}$ тела начинают относительное движение, причем для поддержания их постоянной относительной скорости требуется сила $F_{ск} \leq F_{\pi \max}$, которую называют силой трения скольжения. Так выглядит картина на макромасштабном уровне (рис. 6.3а). На самом деле даже при $0 < F_{\pi} < F_{\pi \max}$ контактирующие тела смещаются на очень малую величину, а именно порядка долей микрометров в направлении действия сдвигающей силы (рис. 6.3б).

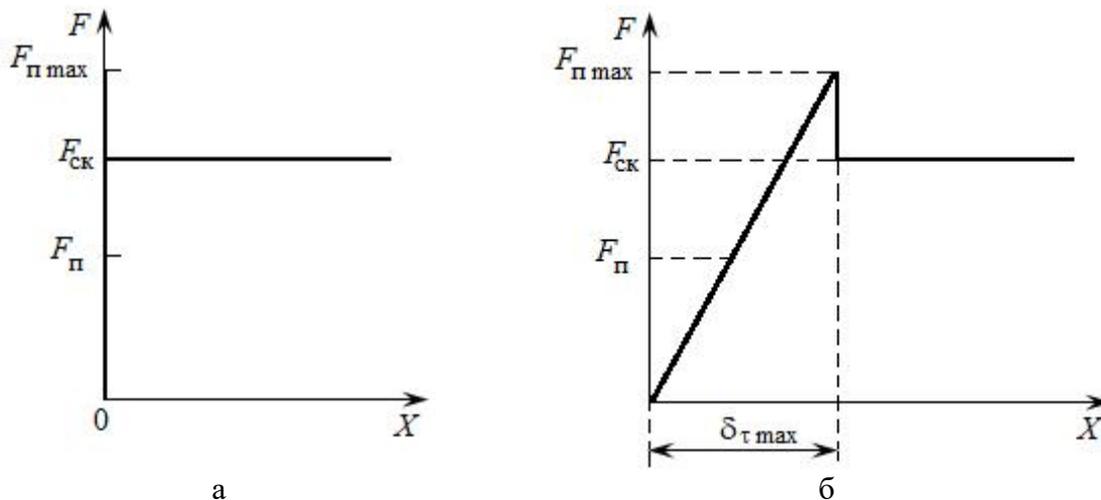


Рис. 6.3. Изменение силы трения при переходе двух контактирующих тел от относительного покоя к относительному скольжению:
а – в обычном масштабе; б – в увеличенном по оси X масштабе

Максимальное тангенциальное смещение контактирующих тел $\delta_{\tau \max}$ (см. рис. 6.3), происходящее под действием максимальной силы трения покоя $F_{\tau \max}$, называется *предварительным смещением*. Рассмотрим его природу на примере контакта двух гладких криволинейных тел, моделирующих выступы шероховатости.

При нагружении первоначально сжатых только нормальной силой N гладких тел правильной сферической формы дополнительной сдвигающей силой F на пятне контакта возникают касательные напряжения. Их распределение по площадке контакта показано на рис. 6.4.

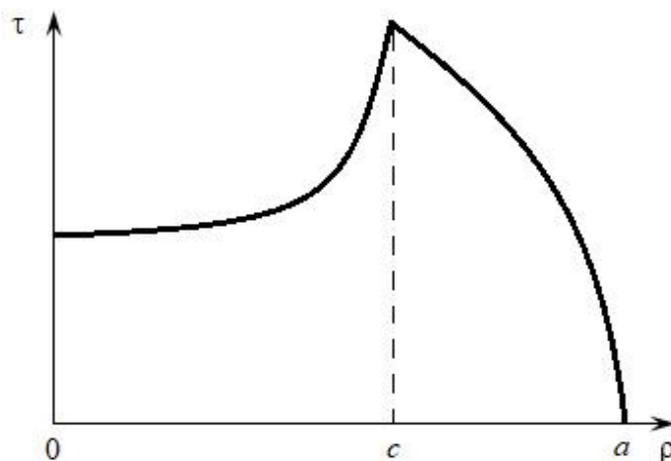


Рис. 6.4. Распределение касательных напряжений τ по радиусу площадки контакта ρ :
 $0 \leq \rho \leq c$ – зона сцепления; $c \leq \rho \leq a$ – зона проскальзывания

На площадке контакта возникают две зоны – сцепления и проскальзывания. Радиус круга сцепления в контакте упругих шаров

$$c = a \left(1 - \frac{F}{fN} \right)^{\frac{1}{3}},$$

полуширина полоски сцепления в контакте упругих цилиндров определяется аналогично:

$$c = b \left(1 - \frac{F}{fN} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

В приведенных формулах a – радиус круговой площадки контакта; b – полуширина полоски контакта; f – коэффициент трения.

Под действием приложенной сдвигающей силы контактирующие тела, сохраняя в целом статический контакт, сдвигаются друг относительно друга в плоскости контакта. Максимальное смещение $\delta_{\tau \max}$, при котором начинается скольжение двух контактирующих тел друг

относительно друга (предварительное смещение), рассчитывается для одинаковых сферических тел по формуле $\frac{\delta_{\tau \max}}{a} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{f p_0}{E^*} \left(\frac{2-\mu}{1-\mu} \right)$.

Величина $\frac{\delta_{\tau \max}}{a}$ обычно имеет порядок 10^{-3} и менее.

Выражая величины a и p_0 из табл. 4.1, можно показать, что величина предварительного смещения $\delta_{\tau \max}$ для контактирующих тел сферической формы пропорциональна их деформации в направлении сжимающей силы δ_n :

$$\delta_{\tau \max} = \frac{1}{2} f \left(\frac{2-\mu}{1-\mu} \right) \delta_n,$$

где f – коэффициент трения; μ – коэффициент Пуассона.

Для контакта шероховатых поверхностей пропорциональность величины предварительного смещения величине нормальной деформации контакта сохраняется, изменяется лишь коэффициент пропорциональности [1]:

$$\delta_{\tau \max} = \frac{k_v}{2} f \left(\frac{2-\mu}{1-\mu} \right) \delta_n,$$

где коэффициент k_v зависит от параметра v степенной аппроксимации начального участка опорной кривой: $k_v \approx 0,5$ при $v = 2$; $k_v \approx 0,6$ при $v = 3$.

В заключение раздела остановимся на одном распространенном проявлении закономерностей силы трения покоя. Положительная разность сил трения $F_{л \max} - F_{ск}$ (см. рис. 6.3) – одна из причин такого явления, как фрикционные автоколебания, знакомые всем по звучанию смычковых музыкальных инструментов, скрипу тормозов, дверных петель, плохо подогнанных половиц и т.п.

Рис. 6.5 иллюстрирует возникновение фрикционных автоколебаний.

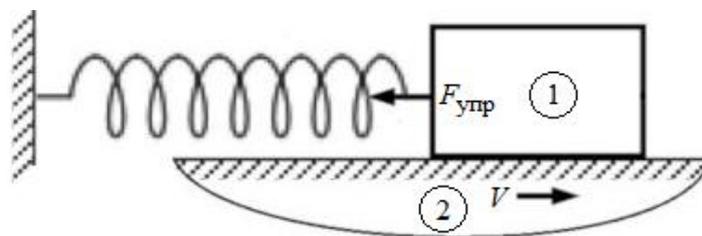


Рис. 6.5. Модель контакта двух тел (1 и 2) для объяснения фрикционных автоколебаний

Тело 1 (например, струна), закрепленное на пружине, контактирует с поверхностью тела 2 (смычка), которое начинает двигаться со скоростью V . Под действием силы трения покоя тело 1 сначала движется вместе с телом 2, растягивая пружину. При этом возрастает сила упругости,

которая уравнивается возрастающей силой трения покоя. Когда сила упругости достигнет максимальной силы трения покоя, тело 1 придет в движение относительно тела 2, получив ускорение в направлении, обратном скорости V , под действием результирующей силы $F = F_{упр} - F_{ск}$. В результате тело 1 остановится и начнет двигаться в сторону, обратную скорости V . При этом растяжение пружины уменьшается. По инерции тело 1 может пройти нулевое положение (когда пружина не деформирована), продолжить движение, сжимая пружину, остановиться и начать двигаться в сторону скорости второго тела V . С того момента, как скорости тел 1 и 2 сравняются, цикл повторяется.

6.3. Трение скольжения

Рассмотрим движение простейшей модели выступа шероховатости – клиновой – по деформируемому полупространству (рис. 6.6). Клин считается абсолютно жестким и бесконечным в направлении, перпендикулярном к плоскости рисунка, поэтому далее будем рассматривать элемент клина единичной длины. На клин действуют нормальная к поверхности полупространства сила N и касательная сила F , равная по величине и противоположная по направлению силе трения скольжения.

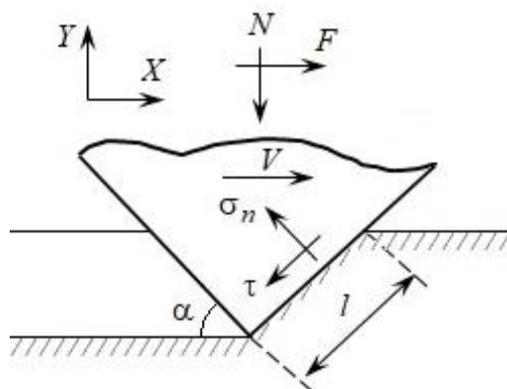


Рис. 6.6. Движение клиновой модели выступа шероховатости по деформируемому полупространству

При постоянной скорости движения клина можно записать условия равновесия в проекциях на оси X и Y :

$$F = \sigma_n l \sin \alpha + \tau l \cos \alpha;$$

$$N = \sigma_n l \cos \alpha - \tau l \sin \alpha,$$

где σ_n и τ – соответственно нормальное и касательное напряжения на площадке контакта клина с полупространством; l – размер площадки

контакта в плоскости рисунка. Напомним, что в направлении, перпендикулярном к плоскости рисунка, размер площадки контакта равен единице.

Тогда по определению для коэффициента трения получаем

$$f = \frac{F}{N} = \frac{\tau \cos \alpha + \sigma_n \sin \alpha}{\sigma_n \cos \alpha - \tau \sin \alpha} = \frac{\frac{\tau}{\sigma_n} + \operatorname{tg} \alpha}{1 - \frac{\tau}{\sigma_n} \operatorname{tg} \alpha}.$$

Обозначим $\tau/\sigma_n = f_{\text{адг}}$, а $\operatorname{tg} \alpha = f_{\text{деф}}$, где $f_{\text{адг}}$ – адгезионная составляющая коэффициента трения; $f_{\text{деф}}$ – его деформационная составляющая. Так как в большинстве случаев произведение $\frac{\tau}{\sigma_n} \operatorname{tg} \alpha \ll 1$, получаем $f \approx f_{\text{адг}} + f_{\text{деф}}$, что выражает адгезионно-деформационную теорию трения.

От клиновой модели выступа шероховатости можно перейти к цилиндрической с помощью рис. 6.7:

$$f_{\text{деф}} = \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\delta}{a} \approx \frac{\delta}{\sqrt{2r\delta}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\delta}{r}} \approx 0,71 \sqrt{\frac{\delta}{r}}.$$

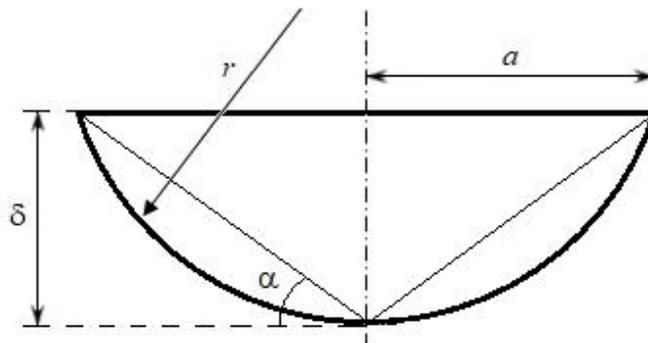


Рис. 6.7. Переход от клиновой модели выступа к цилиндрической

Для наиболее реалистичной сферической модели выступа расчеты приводят к аналогичной формуле:

$$f_{\text{деф}} \approx 0,55 \sqrt{\frac{\delta}{r}}. \quad (6.1)$$

Выражение (6.1) получено для деформационной составляющей коэффициента трения при пластической деформации контактирующих выступов шероховатости. При их упругой деформации работа внешней силы, обеспечивающей относительное движение контактирующих тел, расходуется не на их пластическую деформацию, а на гистерезисные потери из-за несовершенной упругости материалов. Поэтому деформационная составляющая коэффициента трения при упругой деформации шероховатости вычисляется по формуле, аналогичной формуле (6.1), но с другим коэффициентом:

$$f_{деф} \approx 0,2\alpha_r \sqrt{\frac{\delta}{r}}, \quad (6.2)$$

где α_r – коэффициент гистерезисных потерь. Для металлов величина α_r порядка сотых: для стали $\alpha_r = 0,02$; для меди и ее сплавов $\alpha_r = 0,04$; для алюминиевых сплавов $\alpha_r = 0,03$ [2]. Как видно из формулы (6.2), деформационная составляющая коэффициента трения металлов при упругой деформации выступов шероховатости очень мала. Для полимеров (и особенно эластомеров) из-за больших гистерезисных потерь деформационная составляющая коэффициента трения на порядок и более может превосходить эту величину для металлов.

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения $f_{адг} = \frac{\tau}{\sigma_n}$ обусловлена молекулярным взаимодействием контактирующих тел в зоне контакта. Если предположить, что на площадках фактического контакта в результате разрушения поверхностных пленок при пластической деформации выступов шероховатости образовались металлические связи⁴, столь же прочные, как в объеме, то касательные напряжения τ равны пределу текучести материала при сдвиге τ_s . По критерию пластичности Треска $\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$, по критерию Мизеса $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$, где σ_s – предел текучести при растяжении, поэтому $\tau_s = (0,5-0,58)\sigma_s$. Среднее нормальное напряжение в контакте при пластической деформации выступов шероховатости $\sigma_n \approx 3\sigma_s$ (см. разд. 4.2.3). Отсюда для адгезионной составляющей коэффициента трения получаем $f_{адг} \approx 0,17-0,19$. На практике коэффициент трения металлов при отсутствии смазочного материала может быть гораздо больше. Одно из объяснений этого состоит в следующем.

Эксперимент показывает, что касательные контактные напряжения τ зависят от нормальных напряжений σ_n :

$$\tau = \tau_0 + \beta\sigma_n, \quad (6.3)$$

где τ_0 – касательные напряжения в отсутствии нормальных напряжений; β – так называемый пьезокоэффициент.

По форме уравнение (6.3) представляет собой не что иное, как закон трения Кулона (см. разд. 1.2). Зависимость (6.3) применима не только к контактными напряжениям, она известна и в механике сплошных сред. Как показали известные эксперименты П. Бриджмена⁵ по исследованию влияния больших давлений на механические свойства материалов [3], предел текучести металлов при сдвиге τ_s в условиях гидростатического давления су-

⁴ Ф. Боуден и Д. Тейбор (см. разд. 1.2) назвали такие площадки контакта «мостиками сварки».

⁵ В 1946 году П. Бриджмен (*P. Bridgman*) получил Нобелевскую премию по физике за исследования и открытия в физике высоких давлений.

щественно возрастает. Зависимость (6.3) известна также в механике грунтов, где она описывает сдвиговую прочность грунтов и горных пород [4].

Из уравнения (6.3) следует, что адгезионная составляющая коэффициента трения

$$f_{адг} = \frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{\tau_0}{\sigma_n} + \beta.$$

Поскольку величина β может иметь порядок несколько десятых (табл. 6.2), значения $f_{адг}$ могут заметно превосходить полученные выше оценки 0,17–0,19.

Параметры τ_0 и β зависят от свойств поверхностного слоя и определяются в основном экспериментально. В табл. 6.2 приведены экспериментальные значения этих параметров для некоторых пар трения по данным авторов и литературных источников.

Таблица 6.2. Параметры τ_0 и β

Материалы пары трения	Условия трения	τ_0 , МПа	β	
Бронза БрАЖН 10-4-4 / сталь 40Х13	Без смазочного материала, $T = 20$ °С	130 ± 16	$0,013 \pm 0,013$	
	Смазочный материал ИПМ-10	$T = 20$ °С	136 ± 21	$0,038 \pm 0,016$
		$T = 150$ °С	192 ± 25	$0,02 \pm 0,02$
Медь М1 / медь М1	Без смазочного материала, $T = 20$ °С	26	0,08	
Алюминий А0 / алюминий А0	То же	9	0,18	
Титан ВТ1-0 / титан ВТ1-0	– " –	38	0,14	
Цинк Ц1 / цинк Ц1	– " –	8	0,16	
Кадмий КД1 / кадмий КД1	– " –	16	0,17	
Сталь ШХ15 [5]	Свинец	– " –	3,5	0,06
	Серебро	– " –	10	0,08
	Медь	– " –	15	0,08
	Никель	– " –	25,5	0,09
	Хром	– " –	19,5	0,12
	Кадмий	– " –	5	0,06
	Титан	– " –	29	0,08
	Олово	– " –	5	0,07
	Индий	– " –	1,5	0,06
	Молибден	– " –	30	0,08
	Сталь 30ХГСА	Смазочный материал – ЦИАТИМ-201	1	0,04
		Смазочный материал – вазелиновое масло	10	0,12
	Бронза БрБ2	Смазочный материал – ЦИАТИМ-201	0,5	0,03
Смазочный материал – вазелиновое масло		1	0,07	

Жаропрочные стали / твердые сплавы [6]	Без смазочного материала, $T = 500\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$	100 ± 50	0,2–0,5
---	--	--------------	---------

6.4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

В научной и учебной литературе приводятся различные варианты количественных и качественных зависимостей коэффициента трения от силы нормального давления: монотонные убывающие и возрастающие, с экстремумом, а также свидетельствующие о независимости коэффициента трения от нормальной силы.

Однако зачастую зависимость коэффициента трения от нагрузки есть просто следствие выбора способа обработки экспериментальных данных. Чаще всего по умолчанию имеется в виду величина коэффициента трения, определяемая по ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» как отношение силы трения к силе нормального давления ($f = F/N$), т.е. фактически на основании закона Амонтона. При этом игнорируется адгезионная составляющая силы трения. Если сила трения подчиняется более общему закону Кулона (см. уравнение (1.2)), то отношение $F/N = A/N + f$ с очевидностью зависит от нормальной нагрузки N даже при постоянстве f .

Поясним сказанное на примере. На рис. 6.8 приведена зависимость силы трения от нагрузки в паре трения металл/металл (золото/золото) на воздухе при комнатной температуре без смазочного материала. На основании этой зависимости рассчитаны значения коэффициента трения по Амонтону $f = F/N$ и по Кулону. В последнем случае величины A и f в законе Кулона определены как коэффициенты линейной регрессии зависимой переменной F на независимую переменную N . Значения коэффициентов трения по Амонтону и Кулону в зависимости от нормальной нагрузки N представлены на рис. 6.9.

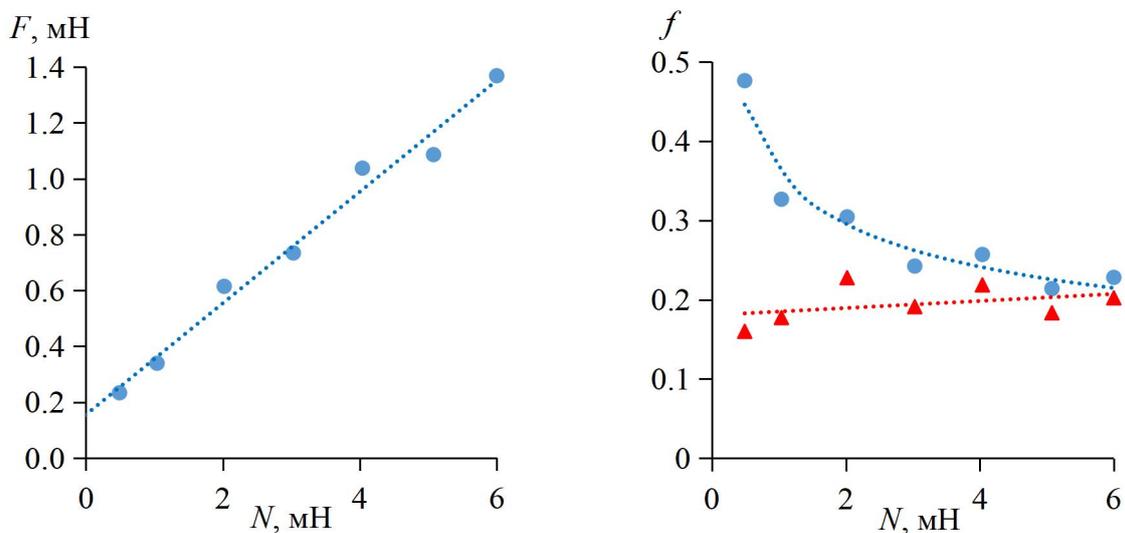


Рис. 6.8. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки (пара трения – золото/золото [1])

Первая зависимость явно выражена, вторая статистически незначима, т.е. коэффициент трения по Кулону можно считать постоянным, не зависящим от нагрузки: $f = 0,20 \pm 0,06$.

Во втором случае исследовалась пара трения металл/керамика (золото / нитрид титана), в которой адгезионное взаимодействие менее сильное, чем в паре трения металл/металл. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки представлена на рис. 6.10, а зависимость коэффициентов трения от нагрузки – на рис. 6.11.

Как и следовало ожидать, по причине слабой адгезии в контакте металл/неметалл величина A в законе Кулона в данном случае оказалась статистически незначима, т.е. по сути к данной паре применим закон трения Амонтона. Коэффициент трения по Амонтону очень слабо зависит от нагрузки (рис. 6.11), а его среднее значение $f = 0,54 \pm 0,02$ в пределах погрешности совпадает с коэффициентом трения по Кулону $f = 0,52 \pm 0,03$.

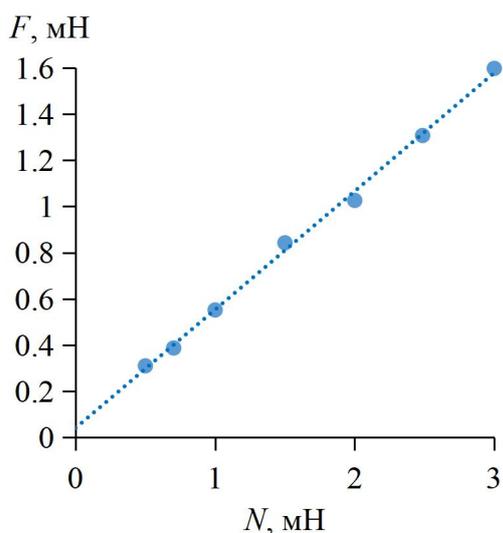


Рис. 6.10. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки (пара трения – золото / нитрид титана [1])

Рис. 6.9. Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки: ● – по Амонтону; ▲ – по Кулону

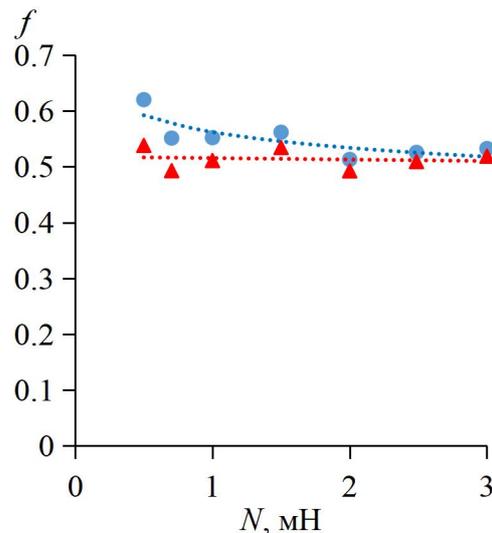


Рис. 6.11. Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки: ● – по Амонтону; ▲ – по Кулону

Таким образом, пренебрежение свободным членом в уравнении, выражающем закон Кулона, приводит к тому, что коэффициент трения, определяемый как отношение силы трения к нормальной силе ($f = F/N$), зависит от величины нормальной силы. В этом случае он не имеет не только физического, но и практического смысла, так как использовать его в расчетах силы трения в инженерных приложениях невозможно: его значения справедливы только для одной-единственной величины силы нормального давления N , для которой они рассчитаны, по ним нельзя

прогнозировать изменение силы трения при изменении нагрузки на фрикционный контакт.

Если использовать двучленную зависимость силы трения от нормальной силы (закон Кулона), то коэффициент трения, входящий в эту зависимость, остается постоянным, не зависящим от нормальной силы. Такой коэффициент трения можно использовать для прогнозирования изменения силы трения при изменении нагрузки на фрикционный контакт.

Ввиду стохастической природы законов трения Амонтона и Кулона соответствующие величины коэффициентов трения должны находиться как коэффициенты линейной регрессии методами математической статистики с проверкой этих величин на статистическую значимость.

6.5. Трение скольжения при больших номинальных давлениях

Трение скольжения при больших номинальных контактных давлениях имеет свою специфику. В этом случае законы трения Амонтона и Кулона неприменимы, так как сила трения становится практически не зависящей от нормальной силы и остается постоянной с ростом последней. В этом случае удельная сила трения $\tau_r = \frac{F}{A_r}$, где F – сила трения, A_r – фактическая площадь контакта, описывается так называемым уравнением Зибеля [7]:

$$\tau_r = mk, \quad (6.4)$$

где k – сопротивление пластическому сдвигу (иногда эту величину называют пластической постоянной); $0 < m < 1$ – коэффициент. Пластическая постоянная k связана с пределом текучести материала при одноосном растяжении σ_s : $k = \sigma_s/2$ по условию пластичности Треска – Сен-Венана и $k = \sigma_s/\sqrt{3}$ по условию пластичности Мизеса. Фактически в этом случае внешнее трение двух контактирующих тел переходит во внутреннее трение, т.е. сдвиг происходит не по формальной границе раздела двух сред, а между поверхностными слоями более пластичного тела.

В работе [8] вводится величина критического давления p_r^* , соответствующего переходу от внутреннего трения к внешнему из условия непрерывности зависимости $\tau_r(p_r)$: $p_r^* = k \frac{m}{f} = (0,50-0,58)\sigma_s \frac{m}{f}$, где f – коэффициент внешнего трения. Если учесть, что, в свою очередь, $\sigma_s \approx \frac{H}{3}$, где H – твердость материала, то окончательно получаем $p_r^* \approx 0,2 \left(\frac{m}{f}\right) H$.

В реальных условиях скачкообразного перехода от одного режима трения к другому, естественно, не происходит и зависимость $\tau_r(p_r)$ плавная,

без изломов. В литературе по обработке металлов давлением [7, 9] эта зависимость описывается единой формулой вида

$$\frac{\tau_r}{k} = m \left(1 - e^{-\alpha \frac{p_r}{\sigma_s}} \right), \quad (6.5)$$

которая при больших значениях контактного давления превращается в формулу (6.4), а при малых – в уравнение, по форме совпадающее с законом Амонтона $\tau = fp_r$, где $f = \frac{k}{\sigma_s} \alpha m$. При $\alpha = 1,25$ [7] коэффициент трения $f = (0,62-0,72)m$.

Рисунок 6.12 иллюстрирует зависимость (6.5) и ее асимптотическое поведение при малых и больших контактных давления в соответствии с формулами (6.4) и (6.5). Переходу от внешнего трения к внутреннему (точка А на рис. 6.12) соответствует значение $p_r^* \approx 0,3H$.

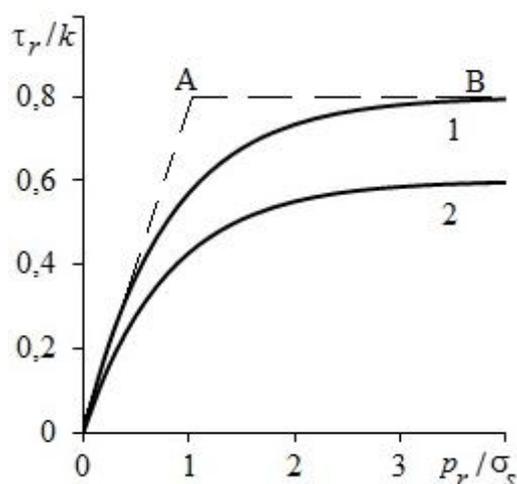


Рис. 6.12. Графическое представление зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления в безразмерном виде:

сплошные линии – по уравнению (6.5);

штриховые: 0А – по закону Амонтона (внешнее трение);

АВ – по уравнению Зибеля (внутреннее трение)

(кривая 1 соответствует значению $m = 0,8$, кривая 2 – $m = 0,6$; коэффициент $\alpha = 1,25$)

Разделение зависимости $\tau_r(p_r)$ на два участка (0А и АВ на рис. 6.12) П. Бриджмен аргументирует следующим [3]. На участке 0А (назовем его, следуя Бриджмену, участком внешнего трения) с ростом контактного давления увеличивается фактическая площадь контакта, причем для дискретного множественного контакта этот рост описывается практически прямо пропорциональной зависимостью $A_r \propto N$. Данная зависимость многократно обоснована теоретическими и экспериментальными работами как для пластического, так и для упругого контакта. Если, согласно

уравнению (6.4), считать $\tau_r = mk$ (существенная адгезия в контакте), то сила трения $F = \tau_r A_r \propto N$, т.е. приходим к закону Амонтона.

На участке АВ (участок внутреннего трения по Бриджмену) фактическая площадь контакта A_r достигла насыщения (см. разд. 5.6) и далее практически не растет с ростом нагрузки, оставаясь тем не менее меньше номинальной площади контакта. Если считать $A_r \approx \text{const}$, то сила трения $F = \tau_r A_r = mkA_r$ практически также остается постоянной, что соответствует уравнению трения Зибеля (6.4).

6.6. Физические теории трения скольжения

Начиная с Леонардо да Винчи исследователи трения пытались объяснить физическую природу этого явления. Сначала это были чисто механические теории, затем появились более сложные модели.

Современная физическая теория трения должна объяснить механизм данного явления на атомарном уровне. При этом необходимо объяснить, во-первых, существование трения покоя и, во-вторых, механизм диссипации энергии при трении скольжения.

Интерес к подобным фундаментальным теориям трения возрос в последнее время в связи с появлением и развитием нанотрибологии, предмет которой и составляют процессы взаимодействия контактирующих поверхностей на атомарном уровне.

Силы молекулярного или атомного взаимодействия трущихся поверхностей имеют электрическую природу. Движение атома в периодическом поле консервативных сил, к которым относятся электрические силы (рис. 6.13), для своего поддержания не требует затрат энергии.

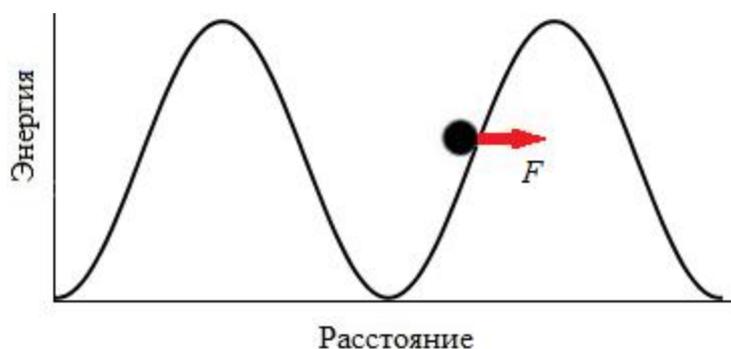


Рис. 6.13. Атом в периодическом силовом поле

Если сообщить атому первоначальный запас энергии, превосходящий высоту потенциального барьера, он будет двигаться по инерции сколь угодно долго. При этом его кинетическая и потенциальная энергии

будут периодически изменяться, но полная энергия будет сохраняться. Отсутствие потерь энергии означает отсутствие трения скольжения. Таким образом, наличие потенциального барьера объясняет существование трения покоя, но не раскрывает механизм трения скольжения.

Одна из физических теорий, объясняющих механизм трения скольжения, известна как теория Прандтля – Томлинсона (*L. Prandtl, G. Tomlinson*) [10]. В этой модели рассматривается движение вереницы независимых осцилляторов в периодическом потенциальном поле с высотой барьера U (рис. 6.14).

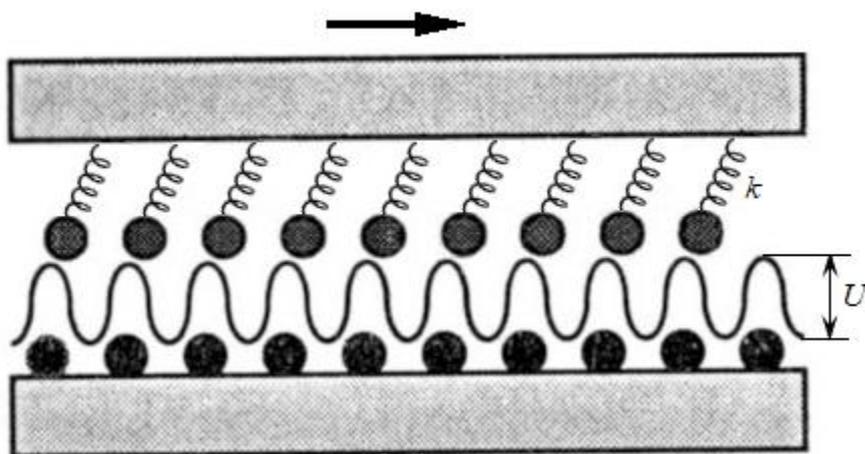


Рис. 6.14. Модель Прандтля – Томлинсона

Осцилляторы представляют поверхностные атомы, не связанные друг с другом, но связанные с жестким основанием (верхним телом) упругими связями с жесткостью k . Периодический потенциал характеризует взаимодействие осцилляторов с контртелом. Для начала движения верхнего тела необходимо приложить некоторую сдвигающую силу (трение покоя). Дальнейшее движение носит скачкообразный характер, представляющий собой суперпозицию колебаний и равномерного движения. С точки зрения физики твердого тела колебания осцилляторов эквивалентны возбуждению избыточных фононов, которые уносят с собой часть энергии. Количество рассеянной энергии зависит от высоты потенциальных барьеров U и жесткости осцилляторов k .

Другая известная физическая теория, рассматривающая процессы трения на атомарном уровне, предложена нашими соотечественниками Я.И. Френкелем и Т.А. Конторовой (модель Френкеля – Конторовой) (рис. 6.15) [11, 12].

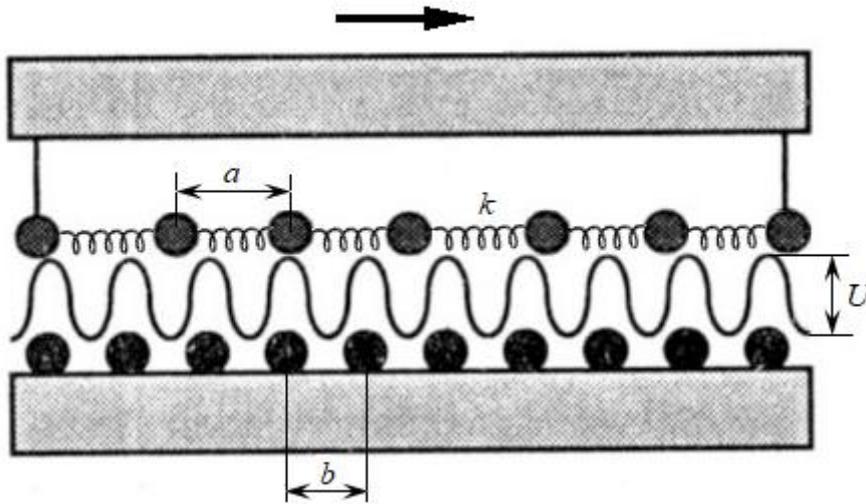


Рис. 6.15. Модель Френкеля – Конторовой

Модель представляет собой цепочку атомов, соединенных между собой упругими связями с жесткостью k . В равновесном состоянии расстояние между атомами в цепочке равно a . Цепочка находится в периодическом потенциальном поле с высотой барьера U , созданном поверхностными атомами контртела. Равновесное расстояние между атомами контртела равно b . Модель позволяет объяснить влияние согласованности (соизмеримости) кристаллических решеток на процесс трения скольжения. Если отношение периодов атомных цепочек a/b выражается иррациональным числом (несогласованные решетки), то сила трения покоя равна нулю, пока отношение U/k мало. Если это отношение превышает некоторое критическое значение, атомная цепочка блокируется периодическим силовым полем, так что для начала движения требуется конечная сила – сила трения покоя.

При относительном движении несогласованных атомных цепочек в случае малой величины отношения U/k сила трения флуктуирует около среднего значения $F = 0$. Если отношение U/k превысит некоторое критическое значение, средняя величина силы трения становится отличной от нуля, но она в несколько раз меньше, чем средняя величина силы трения согласованных решеток. В модели Френкеля – Конторовой оптимальное условие для такого сверхнизкого трения соответствует «золотому сечению»: $\frac{a}{b} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ при $a < b$ и $\frac{a}{b} = \frac{\sqrt{5}+1}{2}$ при $a > b$.

Интересным результатом модели Френкеля – Конторовой является существование так называемых кинков (другое название – топологические солитоны) [13]. Вообще солитон – структурно устойчивая уединенная волна, но при этом обладающая свойствами частицы (квазичастица). Кинк имеет эффективную массу и энергию. Минимальный энергетический барьер, который кинк должен преодолеть для начала движения (барьер

Пайерлса – Набарро), гораздо ниже, чем максимальная высота потенциального барьера $U(x)$ поверхностных атомов контртела (рис. 6.16). В результате кинк обладает высокой подвижностью.

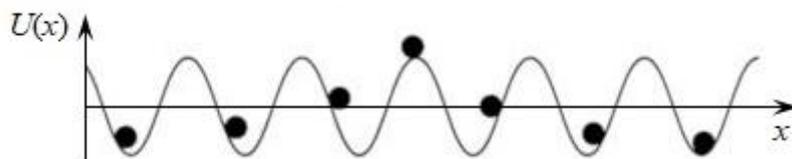


Рис. 6.16. Конфигурация связанных частиц в модели Френкеля – Конторовой, соответствующая одному кинку

Остановимся еще на одной физической модели трения на атомарном уровне, а именно на так называемой модели «булыжной мостовой» (*cobblestone model*) [11, 14]. Название объясняется тем, что трение двух твердых тел сравнивается с движением тачки по булыжной мостовой (рис. 6.17).

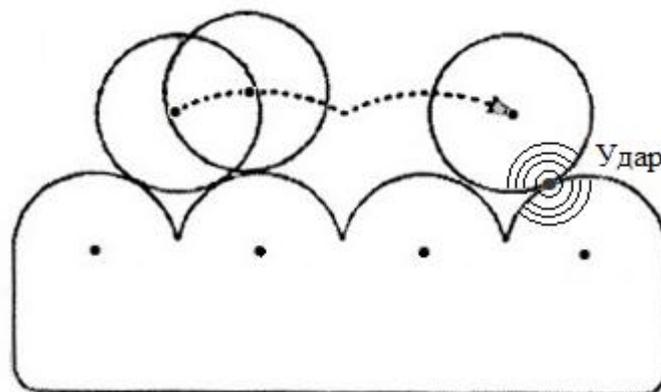


Рис. 6.17. Модель «булыжной мостовой»

Колесо тачки соответствует молекуле верхнего твердого тела, а булыжники играют роль атомной шероховатости поверхности нижнего тела. Механизм диссипации энергии, согласно этой модели, связан с так называемым адгезионным гистерезисом и состоит в следующем. Процесс относительного движения трущихся тел сопровождается чередованием отдаления и сближения поверхностей при подъеме и спуске верхнего тела (см. пунктир на рис. 6.17). Энергия, затраченная на подъем, возвращается при спуске. Это справедливо как для тачки в гравитационном поле, так и для атома в поле адгезионных сил. В случае гравитационного поля эти энергии равны. Если бы они были равны в случае адгезионных сил, потери энергии при относительном движении тел отсутствовали бы и сила трения равнялась бы нулю. В модели булыжной мостовой считается, что существует положительная разница энергий $\Delta\gamma = \gamma_r - \gamma_a$, где γ_r – энергия,

затраченная на отдаление поверхностей; γ_a – энергия, возвращающаяся в систему при сближении поверхностей. Таким образом, при смещении тел на величину периода кристаллической решетки теряется часть энергии, на восполнение которой требуется работа внешней тангенциальной силы.

В процессе контактирования атомов или молекул, подобно удару колеса тачки о булыжник (см. рис. 6.17), возникают упругие колебания (возбуждаются избыточные фононы), на что также невосполнимо расходуется энергия.

Как видим, одним из универсальных механизмов рассеяния энергии в рассмотренных физических теориях трения считается фононный механизм.

6.7. Особенности трения при граничной смазке [2, 16, 17]

Трение при граничной смазке – один из видов трения со смазочным материалом. Он характеризуется наличием на поверхности трения введенного смазочного материала в виде тонкого слоя – от мономолекулярного до пленки толщиной в доли микрометра. Назначение этого слоя – заменить сильные адгезионные связи поверхностных атомов или молекул контактирующих тел (например, металлические) слабыми ван-дер-ваальсовыми связями. В результате коэффициент трения снижается по сравнению с режимом трения без смазочного материала в несколько раз, а величина износа – в сотни раз. Даже такой несовершенный смазочный материал, как керосин, уменьшает коэффициент трения по сравнению с сухим трением примерно в 10 раз, а величину износа – практически в 200 раз.

Принципиальное условие эффективной граничной смазки – присутствие в смазочном материале активных молекул. Характерным представителем активных молекул являются молекулы жирных кислот – лауриновой, стеариновой, пальмитиновой и т.п. Молекула такой кислоты представляет собой цепочку атомов углерода (до двадцати и более атомов) с полярной группой COOH на конце (рис. 6.18). Молекулы своими полярными группами взаимодействуют с поверхностью твердого тела по механизму физической или химической адсорбции (см. разд. 2.4), образуя упорядоченную квазикристаллическую структуру (рис. 6.19). На первый монослой адсорбируются другие молекулы, образуя чередующиеся слои, в которых полярные группы направлены друг к другу, а углеводородные радикалы – наружу. Число таких слоев может достигать до нескольких десятков. Молекулы ПАВ в граничном слое взаимодействуют между собой не только полярными группами COOH на концах, но и по всей длине метиленовыми группами CH_2 , что повышает прочность таких слоев.

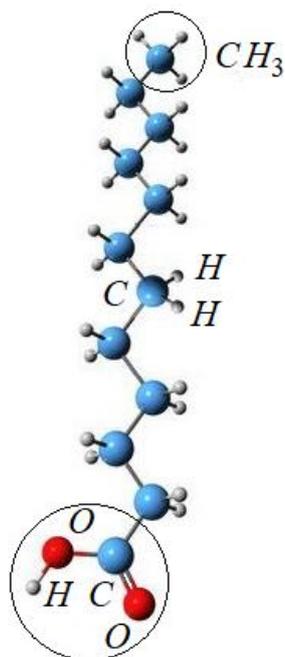


Рис. 6.18. Пример строения молекулы жирной кислоты (выделены активная группа H-O-C=O и метильная группа CH_3)

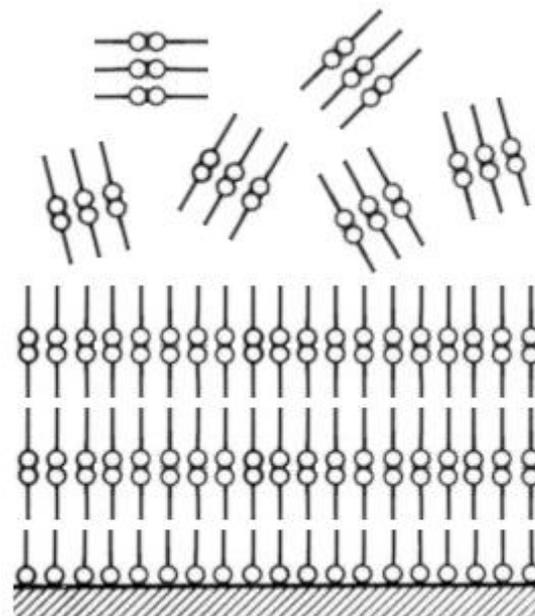


Рис. 6.19. Ориентация молекул смазочного материала на поверхности твердого тела

Граничная пленка смазывающего материала обладает высоким сопротивлением сжатию – до нескольких гигапаскалей, что сравнимо с твердостью металлов. В то же время между собой отдельные параллельные слои в этой пленке связаны слабо. Энергия взаимодействия между концевыми метильными группами CH_3 соседних слоев смазочного материала (см. рис. 6.18 и 6.19) порядка 0,04 эВ, что, к примеру, в сотни раз меньше энергии металлических связей (порядка единиц электронвольт). Поэтому такая слоистая структура обеспечивает малое сопротивление сдвигу. Для наглядности ее сравнивают с колодой игральных карт, которая выдерживает большие нормальные давления, но легко сдвигается при малейших тангенциальных усилиях.

Механизм трения при граничной смазке в целом аналогичен механизму сухого трения. Схематически контакт твердых тел с поверхностной граничной пленкой представлен на рис. 6.20. Поскольку в ближайших к поверхности твердого тела слоях углеводородные цепи молекул смазочного материала ориентированы перпендикулярно поверхности, их условно изображают в виде своеобразного молекулярного ворса (рис. 6.20а).

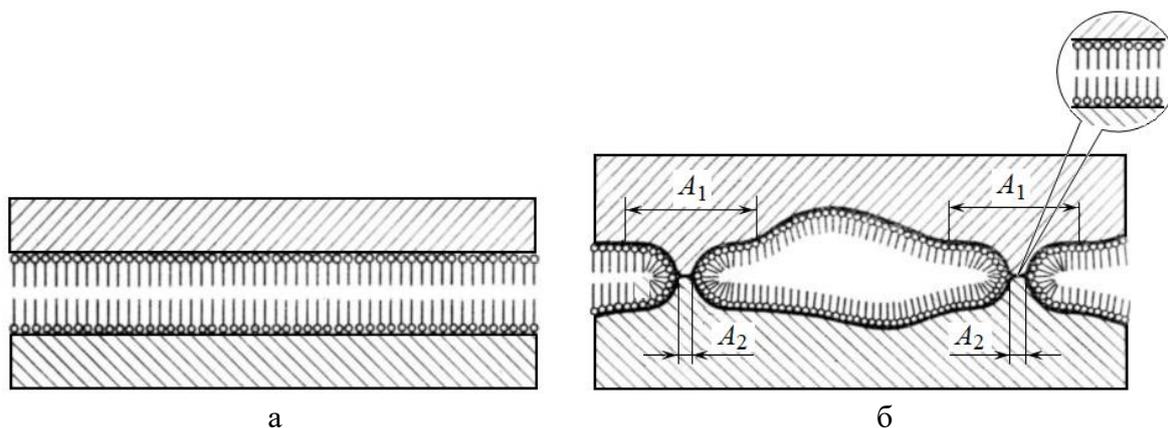


Рис. 6.20. Схема контакта поверхностей твердых тел при граничной смазке:
а – гладкие поверхности; б – шероховатые

Двучленная зависимость (6.3) при граничном трении остается справедливой, естественно, при меньших по сравнению с сухим трением величинах τ_0 (см. табл. 6.2).

При контактировании реальных шероховатых поверхностей под действием нормальной нагрузки происходит деформация выступов шероховатости в основном без разрушения пленки смазочного материала (см. рис. 6.20б), поэтому деформационная составляющая коэффициента трения для мономолекулярных слоев практически не изменяется по сравнению с сухим трением. С ростом толщины пленки, когда ее толщина стремится к высоте шероховатости, деформационная составляющая коэффициента трения уменьшается и влияние шероховатости становится менее выраженным (рис. 6.21).

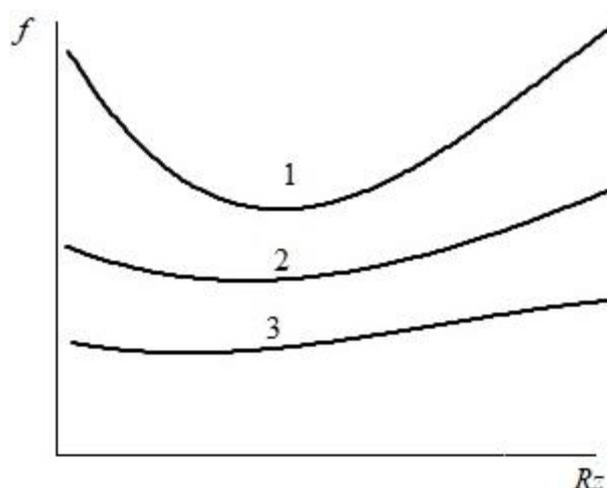


Рис. 6.21. Качественная зависимость коэффициента граничного трения от шероховатости поверхности Rz и толщины граничной пленки δ :
1 – δ_1 ; 2 – $\delta_2 = 300 \cdot \delta_1$; 3 – $\delta_3 = 1\,000 \cdot \delta_1$

Площадь контакта A_1 , воспринимающая нормальную нагрузку, превышает площадь непосредственного контакта выступов шероховатости A_2 вследствие способности граничной пленки сопротивляться сжатию (см. рис. 6.20б). На некоторых площадках контакта, которые подверглись большой пластической деформации или на которых наблюдаются локальные температурные вспышки при трении, пленка смазочного материала может разрушиться, и тогда в контакт вступают незащищенные поверхности контактирующих тел. В результате сила трения увеличивается. Вследствие подвижности молекул смазочного материала (подобно двумерному газу) нарушенная смазочная пленка способна самозалечиваться.

Граничная смазочная пленка в процессе трения изнашивается, если она лишена возможности восстанавливаться: часть молекул адсорбируется на продуктах износа, другие сублимируются с ее поверхности как с поверхности твердого тела. Возможно окисление смазочного материала, что также приводит к потере смазывающей способности.

Вязкость смазывающего материала напрямую не влияет на процесс трения при граничной смазке, что следует из механизма смазывающего действия. Квазикристаллическая структура граничной пленки исключает перенос импульса в слоях смазывающего материала, в чем и состоит механизм вязкости.

Граничное трение чувствительно к температуре контакта. При повышении температуры коэффициент трения сначала остается практически постоянным, затем при некоторой критической температуре происходит его резкий рост (рис. 6.22). Критическая температура для пленок жирных кислот на химически неактивных металлах находится в диапазоне 40–80 °С, на активных металлах – в диапазоне 90–150 °С. Разница критических температур связана с тем, что на поверхности неактивных металлов молекулы жирных кислот адсорбированы физически, тогда как на поверхности активных – химически. При температуре выше критической начинается процесс дезориентации молекул в граничном слое, и его смазывающая способность уменьшается (рис. 6.23).

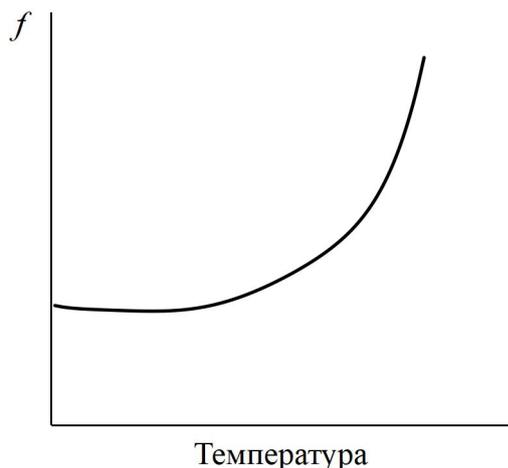


Рис. 6.22. Качественная зависимость коэффициента трения от температуры при граничной смазке

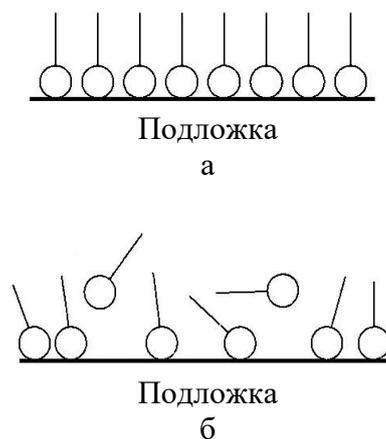


Рис. 6.23. Адсорбированные молекулы ПАВ на поверхности металла:
а – температура ниже критической;
б – температура выше критической

При дальнейшем повышении температуры коэффициент трения может снижаться, но механизм смазочного действия будет уже иной.

6.8. Трение качения

Рассмотрим качение цилиндрического катка по плоской поверхности неподвижной детали под действием внешней силы F , направленной параллельно поверхности. Каток нагружен нормальной силой N . Для начала будем считать контактирующие тела абсолютно твердыми (рис. 6.24а). При отсутствии проскальзывания по линии контакта скорость катка в точках соприкосновения с плоскостью равна нулю. В этом случае каток совершает вращательное движение вокруг мгновенной оси вращения, проходящей через точку A перпендикулярно плоскости рисунка. Уравнение движения катка имеет следующий вид (если не принимать во внимание сопротивление среды, в которой происходит движение):

$$J_A \varepsilon = FR,$$

где J_A – момент инерции катка относительно мгновенной оси вращения; ε – угловое ускорение. Из этого выражения следует, что под действием постоянной силы F каток будет двигаться ускоренно.

Реальные тела деформируемы, поэтому контакт того же катка с плоскостью будет происходить не по линии, а по площадке контакта, смещенной от оси катка в сторону движения (рис. 6.24б). На рис. 6.24б каток считается по-прежнему абсолютно твердым. В результате реакция опоры N' смещена относительно оси катка на величину λ . Для сохранения

постоянной скорости качения должно выполняться равенство моментов относительно мгновенной оси вращения A : $FR = \lambda N'$. Поскольку $N = N'$, а $F = F'$, где F' – сила трения качения, получаем закон Кулона для трения качения (см. разд. 1.2):

$$F_{тр} = \lambda \frac{N}{R}. \quad (6.6)$$

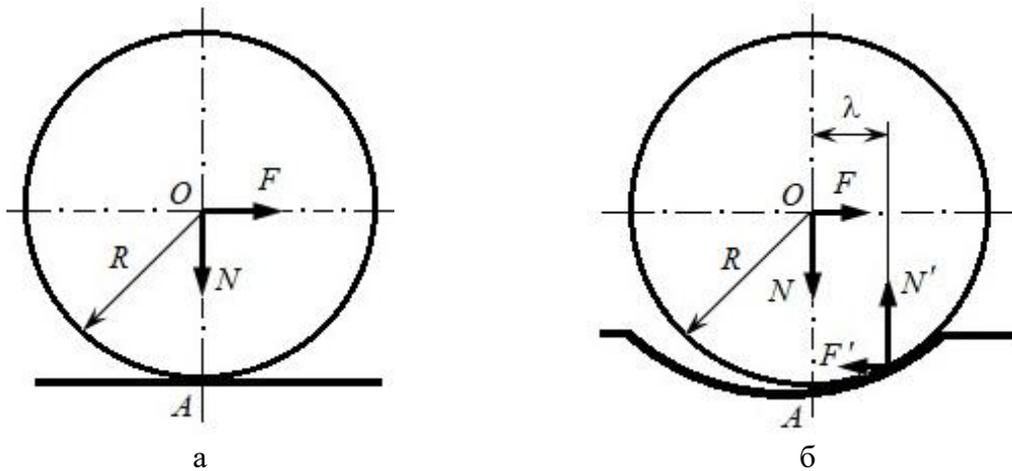


Рис. 6.24. Трение качения: а – абсолютно твердых тел; б – деформируемых тел

Величина λ называется коэффициентом трения качения и имеет размерность длины, что нетипично для коэффициентов и неудобно с практической точки зрения. Такая ситуация связана с тем, что при вращательном движении внешнюю нагрузку правильнее было бы выражать моментом M , а не силой. Тогда условие постоянства скорости имеет вид $M = FR = \lambda N'$. Отсюда следует физический смысл величины λ – это плечо силы реакции опоры на внешнюю нормальную нагрузку N .

Используется также безразмерный коэффициент, характеризующий трение качения. Безразмерную величину $f = F/N$ называют коэффициентом сопротивления качению. Так как $F = \lambda N/R$, то $f = \lambda/R$. Достоинство величины f – ее безразмерность, недостаток – зависимость от радиуса катка. Тем не менее если радиус тела качения известен по умолчанию (как, например, в случае подшипника качения определенной марки), использовать величину f для расчета силы трения более удобно, чем размерную величину λ .

Уравнение (6.6) в полной мере применимо и к качению тела сферической формы. Основанное на чисто механическом подходе, оно не раскрывает механизмов рассеяния энергии при трении качения.

Согласно современным представлениям, основными такими механизмами являются:

- проскальзывание на площадке контакта катка с основанием;
- упругий гистерезис контактирующих тел;
- адгезионное взаимодействие между катком и основанием.

Рассмотрим их подробнее.

Проскальзывание на площадке контакта [10]. На рис. 6.25 показано распределение касательных напряжений в контакте цилиндра, катящегося вправо по плоской поверхности. Площадка контакта шириной $2a$ разделена на зоны схватывания (на входе катка в контакт с плоскостью) и проскальзывания (на выходе из контакта). В зоне проскальзывания действует закон трения Амонтона $\tau(x) = f_c p(x)$, где f_c – коэффициент контактного трения; $p(x)$ – нормальное давление.

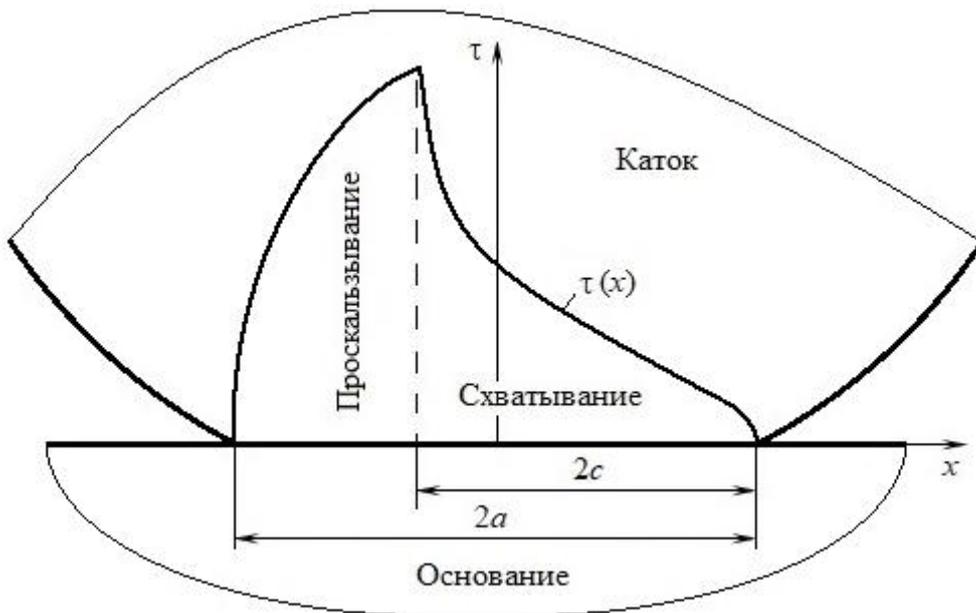


Рис. 6.25. Зоны проскальзывания и схватывания при трении качения

Полуширина зоны схватывания c связана с полушириной полосы контакта a зависимостью

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{F}{f_c N}\right)^{\frac{1}{2}},$$

которая иллюстрируется рис. 6.26. Из рис. 6.26 видно влияние коэффициента контактного трения на величину проскальзывания в контакте катка с основанием: чем больше коэффициент контактного трения, тем меньше зона проскальзывания. Когда соотношение тангенциальной и нормальной сил F/N достигает значения коэффициента контактного трения f_c , проскальзывание распространяется на всю

площадку контакта и начинается макроскольжение катка по основанию. Пока этого не произошло, каток и основание находятся в состоянии относительного покоя, но в зоне проскальзывания происходит диссипация энергии за счет обыкновенного трения скольжения с его механизмами диссипации энергии.

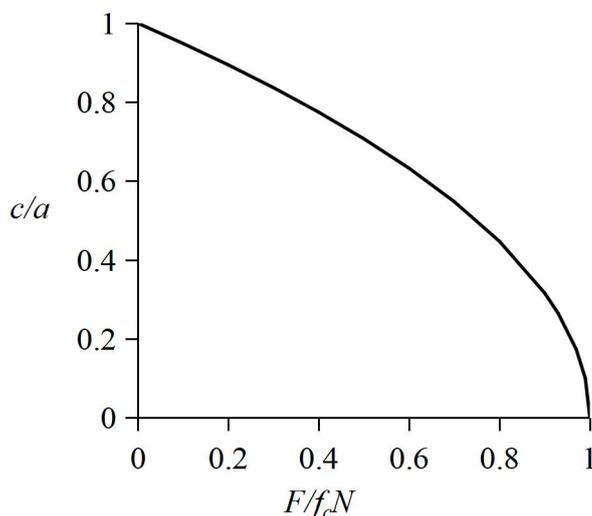


Рис. 6.26. Зависимость полуширины области схватывания от соотношения действующих на каток тангенциальной и нормальной сил F/N и коэффициента контактного трения f_c

Упругий гистерезис. Поскольку явление гистерезиса важно для объяснения не только природы трения качения, но и трения скольжения при упругом контакте (см. разд. 6.3), остановимся на этом явлении подробнее.

Для идеально упругого материала зависимость между напряжением и деформацией выражается законом Гука (*R. Hooke*) $\sigma = E\varepsilon$ (для растяжения – сжатия) или $\tau = G\gamma$ (для деформации сдвига), где σ , τ – нормальные и касательные напряжения соответственно; E , G – соответствующие модули упругости; ε , γ – соответствующие деформации. Для такого материала процессы нагружения и разгрузки полностью обратимы и не сопровождаются рассеянием энергии. В реальных твердых телах вследствие релаксационных явлений, имеющих различную природу, наблюдаются отступления от закона Гука [18].

Если очень быстро (адиабатически) приложить к некоторому образцу нормальное или касательное напряжение, он получит соответствующую деформацию (точка *A* на рис. 6.27а). При этом материал образца будет находиться в неравновесном состоянии. Если выдержать затем образец под приложенным напряжением до наступления состояния равновесия, образец получит дополнительную деформацию (точка *B* на рис. 6.27а). При мгновенном уменьшении напряжения до нуля в образце

сохраняется некоторая остаточная деформация (отрезок OC на рис. 6.27а), которая со временем исчезает. В результате получается петля гистерезиса $OABCO$.

Реальные деформации происходят не мгновенно, а с конечной скоростью, так что релаксационные явления сказываются на протяжении всего процесса деформации, вызывая отступление от линейной зависимости между напряжением и деформацией. В результате реальная петля гистерезиса выглядит примерно так, как это показано на рис. 6.27б. Подчеркнем, что напряжение при этом не превосходит предела упругости.

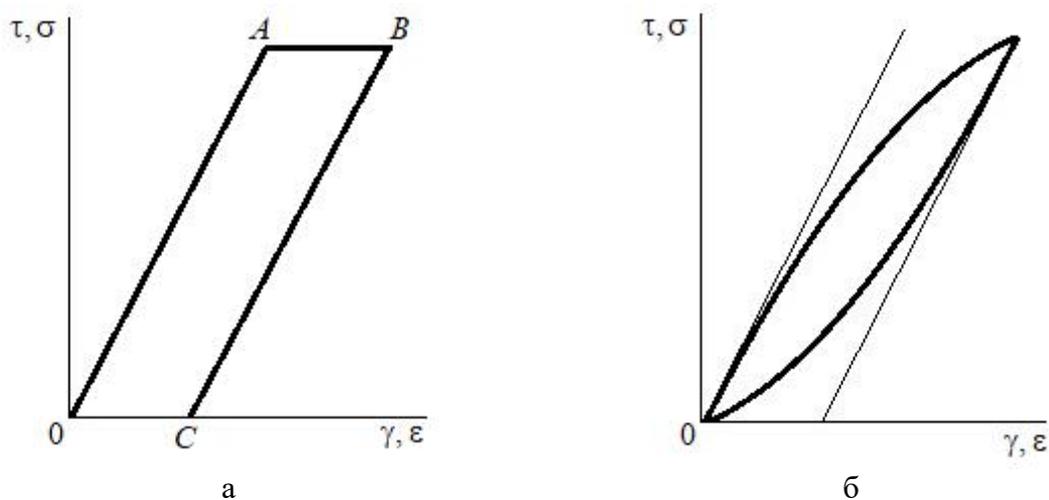


Рис. 6.27. Гистерезис при деформации упругого материала:
а – идеализированный; б – реальный

Площадь петли гистерезиса пропорциональна части механической энергии, потерянной в результате упругого гистерезиса и перешедшей в тепло.

При трении качения материал катка неизбежно подвергается многократным циклам нагружения и разгрузки с потерей части механической энергии вследствие описанного выше гистерезисного механизма. Материал основания также может испытывать циклические нагрузки при замкнутой траектории катка, как, например, в подшипниках качения. Эти циклические деформации сопровождаются гистерезисными потерями.

Сильнее всего гистерезисные потери проявляются в эластомерах, менее – в полимерах и еще менее в металлах.

Составляющая силы трения качения F_r , обусловленная упругим гистерезисом, может быть оценена по формуле [19]

$$F_r = \alpha_r A',$$

где A' – упругая энергия, затрачиваемая на единицу пути качения; α_r – коэффициент гистерезисных потерь. Необходимо иметь в виду, что

коэффициент гистерезисных потерь при качении в 2–3 раза больше аналогичного коэффициента для одноосного растяжения.

Величина A' рассчитывается по формулам:

для качения цилиндра

$$A' = \frac{2}{3\pi} \frac{Na}{R},$$

качения шара

$$A' = \frac{3}{16} \frac{Na}{R},$$

где N – нормальная нагрузка на каток; R – радиус катка; a – полуширина полоски контакта для цилиндра или радиус площадки контакта для шара.

Адгезия. Адгезионное взаимодействие контактирующих тел также вносит свой вклад в сопротивление качению. При этом адгезионные взаимодействия тел при качении и скольжении различаются, что связано с кинематическими различиями качения и скольжения [19].

При трении качения адгезионные связи образуются между контактирующими телами при вхождении их в контакт (на передней кромке контакта) и разрушаются при выходе (на задней кромке). При этом адгезионные силы направлены нормально к поверхности контакта, а не вдоль нее, как при трении скольжения, т.е. адгезионные связи разрушаются вследствие растяжения, а не сдвига. К тому же разрушение адгезионных связей происходит постепенно, а не одновременно по всей площади контакта, как при трении скольжения. Этими различиями можно отчасти объяснить меньшую величину силы трения качения по сравнению с силой трения скольжения.

Однако основную роль в механизме диссипации энергии при трении качения в нормальных условиях, по мнению большинства трибологов, играют гистерезисные потери [16].

6.9. Жидкостное трение

6.9.1. Природа жидкостного трения и его характеристики

Жидкостное трение – одна из разновидностей трения со смазочным материалом, при котором фрикционные характеристики пары трения практически полностью определяются свойствами этого материала. Трущиеся поверхности разделены слоем жидкости, воспринимающим приложенную к контакту нормальную нагрузку. Минимальная толщина

смазочного слоя должна, очевидно, превышать сумму максимальных высот неровностей обеих поверхностей для исключения вероятности непосредственного контакта вершин неровностей шероховатости контактирующих тел:

$$h_{\min} = K(R_{z1} + R_{z2}),$$

где $K = 1,2-1,3$ [17].

В режиме жидкостного трения природа сопротивления относительно перемещению контактирующих твердых тел принципиально иная по сравнению с сухим и граничным трением. Внешнее трение заменяется внутренним между слоями жидкого смазочного материала, т.е. вязкостью.

По физической природе вязкость – одно из явлений переноса, а именно перенос импульса. Проявляется вязкость при наличии градиента скорости слоев жидкости dV/dX .

Рассмотрим слой жидкого смазочного материала в зазоре между двумя поверхностями твердых тел (рис. 6.28). Толщина зазора h . Будем считать нижнее тело условно неподвижным, а верхнее – движущимся с относительной скоростью V . Очевидно, что в жидкости возникает градиент скорости и, соответственно, сила внутреннего трения, которая определяется по закону Ньютона для вязкой среды

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

где η – коэффициент динамической вязкости (или просто вязкость); S – площадь сдвига. Переписав это уравнение для касательного напряжения $\tau = F/S$, получим

$$\tau = \eta \frac{dV}{dX} \approx \eta \frac{V}{h},$$

где h – толщина зазора между поверхностями твердых тел. Жидкости, в которых касательные напряжения пропорциональны градиенту скорости, называются ньютоновскими. К ньютоновским жидкостям относится большинство минеральных и растительных масел при не слишком низких температурах. Некоторые смазочные материалы, например консистентные смазки, относятся к числу неньютоновских сред.

В подшипнике скольжения в режиме жидкостной смазки вал и втулка разделены слоем смазочного материала толщиной h (рис. 6.29). При достаточно большой угловой скорости вращения вала и небольшой нагрузке на подшипник вал можно считать соосным втулке подшипника скольжения, т.е. толщина смазочного слоя h постоянна.

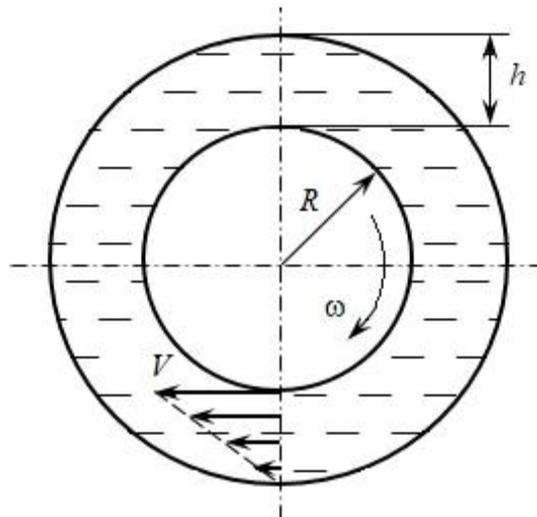
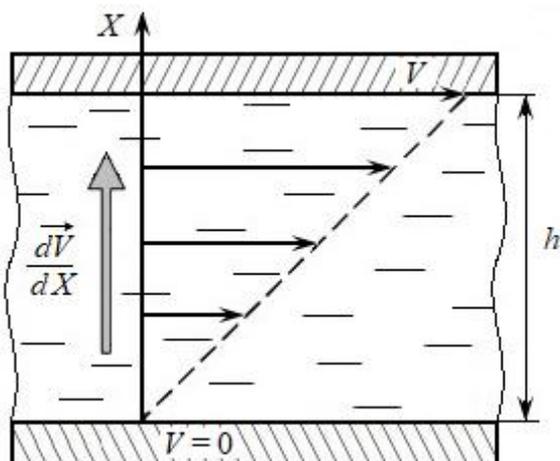


Рис. 6.28. Градиент скорости в жидкости Рис. 6.29. Схема подшипника скольжения

Момент сопротивления вращению вала (момент жидкостного трения) можно рассчитать по формуле

$$M = FR = \tau SR = \frac{\eta V}{h} 2LR^2 = \frac{2\pi\eta\omega LR^3}{h}, \quad (6.7)$$

где $\omega = V/R$ – угловая скорость вала; $S = 2\pi RL$ – площадь поверхности вала; L – длина подшипника. Из уравнения (6.7) видно, что на величину момента сопротивления наибольшее влияние оказывает радиус вала.

Из уравнения (6.7) для коэффициента трения $f = F/N$ получаем

$$f = \frac{M}{RN} = \frac{\pi\eta\omega R}{ph},$$

где $p = N/2RL$ – среднее нормальное давление в подшипнике.

Введя обозначение для относительной толщины зазора $h/R = \psi$, окончательно получим формулу для коэффициента жидкостного трения:

$$f = \frac{\pi\eta\omega}{p\psi}. \quad (6.8)$$

Формулы (6.7) и (6.8) называют формулами Петрова. Наш соотечественник Н.П. Петров наряду с О. Рейнольдсом (*O. Reynolds*) считается основоположником гидродинамической теории смазки. Результаты его исследований трения со смазочным материалом были опубликованы в 1883 году.

Комбинация размерных величин в уравнении (6.8) образует безразмерный комплекс $\frac{\eta\omega}{p}$, от которого коэффициент жидкостного трения, согласно формуле Петрова, находится в прямо пропорциональной

зависимости (рис. 6.30). Иногда этот комплекс называют числом Герси. Как отмечалось выше, формула Петрова справедлива для достаточно больших скоростей вращения вала и малых нагрузок, т.е. для больших величин числа Герси. При уменьшении этого числа, начиная с некоторых его значений, прямая пропорциональность коэффициента трения и числа Герси нарушается (точка *A* на рис. 6.30), хотя режим жидкостного трения сохраняется. Как видно из рис. 6.30, на зависимости коэффициента трения от числа Герси имеется минимум f_{\min} , левее которого характер этой зависимости принципиальной меняется. Зона III на графике $f\left(\frac{\eta\omega}{p}\right)$ справа от точки *B* соответствует жидкостному режиму трения, зона II – так называемому смешанному (полужидкостному) режиму. В смешанном режиме одни участки поверхности контакта разделены слоем жидкого смазочного материала, а другие – граничным слоем. На границе зон жидкостного и полужидкостного режимов расположена зона так называемого эластогидродинамического (или упругогидродинамического) трения. Зона I на графике $f\left(\frac{\eta\omega}{p}\right)$ соответствует режиму граничного трения.

Кривую зависимости коэффициента трения от числа Герси называют кривой (диаграммой) Герси – Штрибека (*Hersey – Stribeck curve*), иногда просто кривой Штрибека.

В режиме жидкостного трения поверхности вала и втулки разделены слоем смазочного материала, толщина которого намного превышает высоту выступов шероховатости, тогда как в смешанном режиме толщина смазочного слоя сравнима с высотой шероховатого слоя. Для оценки вероятности реализации того или иного режима трения со смазочным материалом предложен критерий

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где h_{\min} – минимальная толщина смазочного слоя; R_{a1} и R_{a2} – параметры шероховатости контактирующих поверхностей [16]. При $\lambda > 3$ режим трения жидкостной, при $\lambda < 1$ – граничный, при $1 < \lambda < 3$ – смешанный.

При расчетах несущей способности подшипника в режиме жидкостного трения вместо критерия Герси используется также безразмерный критерий, включающий дополнительно безразмерную толщину зазора $\psi = h/R$. Этот критерий называют числом Зоммерфельда⁶ *So*:

⁶ Арнольд Зоммерфельд (*A. Sommerfeld*) – знаменитый немецкий физик-теоретик, основатель Мюнхенской школы теоретической физики (В. Гейзенберг, В. Паули, П. Дебай, Х. Бете и др.). Область научных интересов – квантовая теория атома, квантовая теория металлов, теоретическая физика.

$$So = \frac{\psi^2 p}{\eta \omega}$$

К сожалению, в литературе иногда числом Зоммерфельда называют обратную величину: $\frac{\eta \omega}{\psi^2 p}$, поэтому следует проявлять осторожность в его использовании.

По значению числа Зоммерфельда устанавливаются границы перехода от одного режима трения к другому. При соблюдении условия $\frac{\psi^2 p}{\eta \omega} < [So]$ режим трения жидкостной (зона III на рис. 6.30), в противном случае – смешанный (зона II на рис. 6.30). Критические значения числа Зоммерфельда $[So]$ зависят от относительного зазора ψ , диаметра вала и соотношения диаметра вала и длины подшипника [19].

Как следует из уравнений (6.7) и (6.8) и самой природы силы жидкостного трения, сила трения, момент трения и коэффициент трения в этом режиме зависят от вязкости смазочного материала.

Единицей измерения динамической вязкости η в системе СИ служит паскаль-секунда (Па·с). Вязкость зависит от свойств смазочного материала, для конкретного материала – от температуры и давления.

Температура очень сильно влияет на вязкость жидких смазочных материалов, которая может снизиться в несколько раз при нагревании всего на 10° (рис. 6.31).

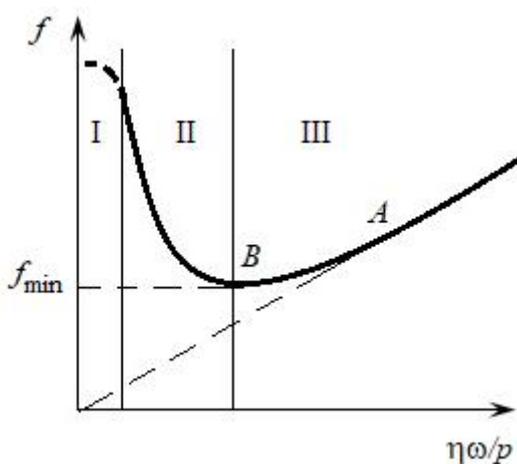


Рис. 6.30. Диаграмма Герси – Штрибека

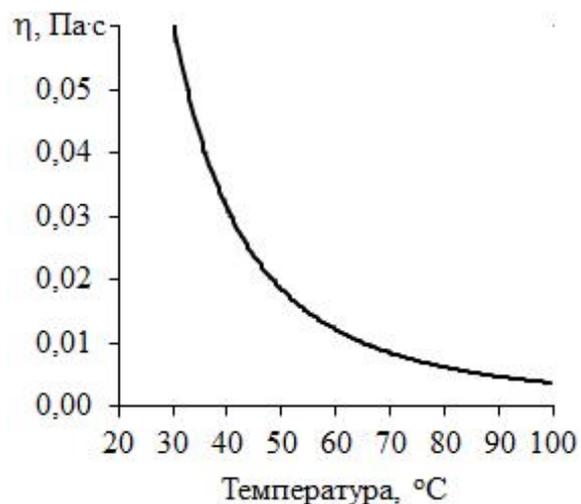


Рис. 6.31. Пример температурной зависимости вязкости (смазочный материал – масло промышленное)

В небольшом диапазоне температур T , не превышающих 100 °С, изменение коэффициента динамической вязкости можно описать приближенной формулой:

$$\eta_2 = \eta_1 e^{-\beta(T_2 - T_1)}.$$

Для наиболее распространенных минеральных масел в диапазоне температур 20–100 °С коэффициент $\beta \approx 0,03\text{--}0,06$. Меньшие значения коэффициента β имеют маловязкие масла, большие – высоковязкие.

Вязкость силиконовых масел зависит от температуры гораздо слабее, для них в том же температурном диапазоне $\beta \approx 0,02$.

При температурах не выше 100 °С можно воспользоваться другой приближенной формулой:

$$\eta_t = \eta_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^m,$$

где η_{50} – коэффициент вязкости при 50 °С; t – температура, °С. Для минеральных масел коэффициент $m \approx 1,5\text{--}2,5$ в диапазоне температур 20–50 °С и $m \approx 2\text{--}3$ в диапазоне 50–100 °С.

Зависимость динамической вязкости от давления p обычно выражают формулой

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p},$$

где η_0 – коэффициент вязкости при нормальном атмосферном давлении; пьезокоэффициент $\alpha = (1,5\text{--}2,5) \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ для минеральных масел и $\alpha = (2,5\text{--}3,5) \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ для синтетических.

Наряду с коэффициентом динамической вязкости в технике применяется коэффициент кинематической вязкости ν (кинематическая вязкость), равный отношению динамической вязкости к плотности вязкой среды ρ :

$$\nu = \eta / \rho.$$

Единицей измерения кинематической вязкости в системе СИ служит квадратный метр на секунду (м²/с).

6.9.2. Гидродинамическое и гидростатическое жидкостное трение

В зависимости от того, как создается слой смазочного материала, разделяющий контактирующие поверхности при жидкостном трении, различают гидродинамическое и гидростатическое трение. В гидродинамическом режиме зазор между поверхностями вала и втулки образуется за счет так называемого гидродинамического эффекта и имеет клиновидную конфигурацию (рис. 6.32). Такая конфигурация наблюдается

уже в исходном положении, когда вал не вращается (рис. 6.32а). С началом вращения вала масло затягивается в зазор и вал как бы всплывает, при этом в образовавшемся масляном клине устанавливается давление p , эпюра которого показана на рис. 6.32б. Центры вала и втулки лежат на прямой, наклоненной к линии действия нагрузки N на угол β и смещены относительно друг друга на расстояние e (эксцентриситет). Минимальная толщина зазора, как следует из рис. 6.32б, определяется по формуле

$$h_{\min} = h - e = h(1 - \varepsilon),$$

где h – толщина зазора (см. рис. 6.29); $\varepsilon = e/h$ – относительный эксцентриситет.

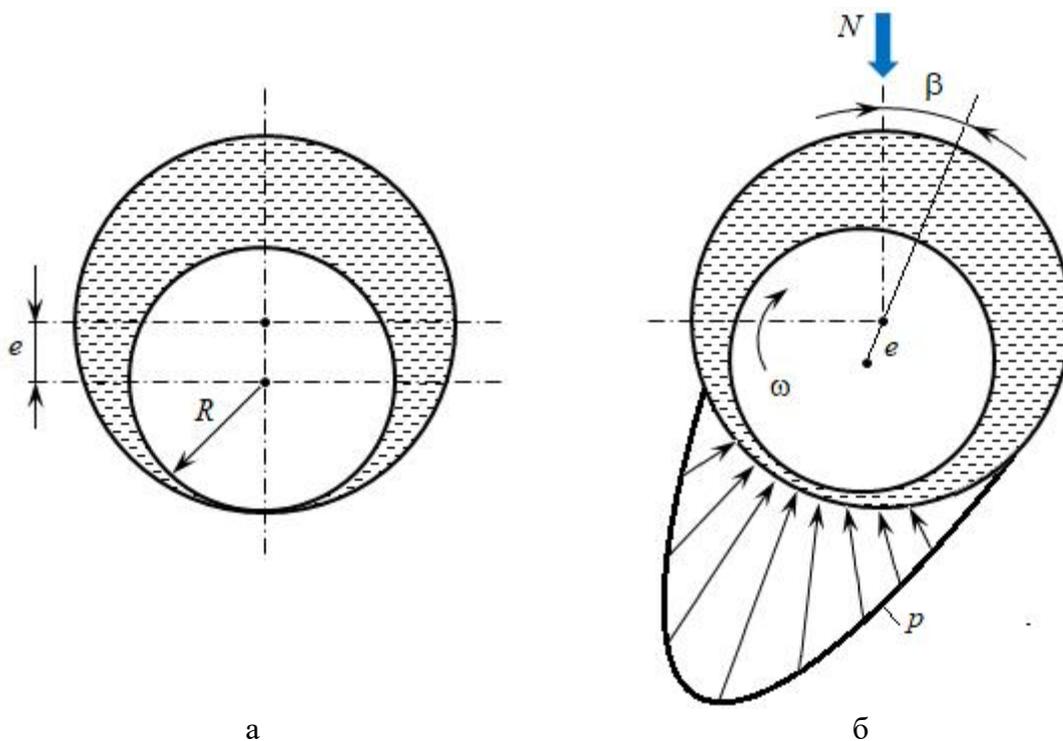


Рис. 6.32. Схема расположения вала в подшипнике:
а – при отсутствии вращения; б – в гидродинамическом режиме

В гидродинамическом режиме для длинного подшипника ($L \gg 2R$) в отсутствие аксиальной утечки жидкости коэффициент трения определяется по формуле [16]:

$$f = \frac{\psi\varepsilon}{2} \sin\beta + \frac{\pi\psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \frac{1}{So}; \quad (6.9)$$

при $\varepsilon = 0$ (т.е. при совпадении осей вала и втулки) формула (6.9) превращается в формулу Петрова (см. уравнение (6.8)).

К недостаткам гидродинамических подшипников скольжения можно отнести то, что в начале вращения вала и при его остановке масляный клин отсутствует и подшипник работает в режиме граничного трения. При этом наблюдается повышенный износ деталей подшипника и высокий по сравнению с жидкостным режимом коэффициент трения.

Этого недостатка лишены гидростатические опоры. В таких опорах жидкостной режим трения возникает за счет внешнего устройства (насоса), создающего давление жидкого смазывающего материала в опоре. Таким образом, жидкостной режим смазки обеспечивается независимо от скорости относительного движения деталей узла трения, в том числе при пуске и остановке. Соответственно, уменьшается износ деталей узла. Гидростатическая смазка применяется в подшипниках прокатных станков, гидротурбин, опорах и направляющих металлорежущих станков. К недостаткам гидростатических опор относится необходимость во внешнем устройстве, создающем давление в жидкости, и дополнительный расход энергии на работу этого устройства, а также необходимость уплотнительных устройств, трение в которых может свести на нет все преимущества жидкостной смазки.

6.9.3. Эластогидродинамическая смазка

Эластогидродинамическая (или упругогидродинамическая, что одно и то же) смазка имеет место в тяжело нагруженных узлах трения, работающих в условиях точечного или линейного контакта (например, подшипники качения или зубчатые передачи). Если при граничной смазке фрикционные характеристики контакта определяются в основном свойствами твердых тел, а при жидкостной – свойствами жидкого смазочного материала, то в режиме эластогидродинамического трения необходимо учитывать и те и другие. В этом режиме проявляется также зависимость вязкости смазочного материала от давления. Как и в гидродинамическом режиме, смазка вовлекается в зазор между валом и втулкой и производит расклинивающее действие. Высокое давление в контакте вызывает упругую деформацию деталей и рост вязкости смазочного материала. В зоне контакта толщина смазочного слоя почти постоянна, а распределение давления практически совпадает с герцевским (см. рис. 4.3), за исключением участка на выходе из контакта. Здесь наблюдается пик давления, часто превышающий максимальное герцевское давление, что может оказать влияние на контактную прочность деталей.

Помимо чисто технических узлов, считается, что эластогидродинамическая смазка обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую несущую способность суставов человека [20].

6.9.4. Газовая смазка

При газовой смазке, как видно из названия, роль смазочного материала играет газ. В основном это воздух, но используются и инертные газы – азот, неон, а также газы с очень низкой вязкостью (например, водород). Газовая смазка применяется в ультрацентрифугах, газовых турбинах, турбокомпрессорах. Частота вращения деталей при газовой смазке может достигать нескольких тысяч оборотов в секунду.

Физическая природа газовой смазки не отличается от природы жидкостной. При этом малая вязкость смазочного материала приводит к очень малым величинам коэффициента трения – порядка 10^{-4} .

Газовая смазка, как и жидкостная, бывает газодинамической и газостатической. Принцип такой классификации тот же: способ создания контактного зазора.

К недостаткам газовой смазки относится низкая несущая способность газовых опор: она на порядок ниже, чем жидкостных.

Список литературы к главе 6

1. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / А.В. Чичинадзе [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
3. Бриджмен П.У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 448 с.
4. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии): учебник для вузов. СПб.: Лань, 2022. 416 с.
5. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
6. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. М.: Машиностроение, 1988. 96 с.
7. Леванов А.Н. Методика испытаний на контактное трение в процессах обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 2. С. 43–47.

8. Сегал В.М., Гладушин В.В., Семенов А.Г. Исследование контактного трения методом конических и наклонных бойков // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 3. С. 5–7.
9. Shillor, M. Models and Analysis of Quasistatic Contact / M. Shillor, M. Sofonea, J.J. Telega // Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. V. 655. 263 p.
10. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
11. Hu Yuan-zhong, Ma Tian-bao, Wang Hui. Energy dissipation in atomic-scale friction // Friction. 2013. V. 1. No. 1. P. 21–40.
12. Хрущев М.М. (мл.) Развитие представлений о внешнем трении / Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: Издательство ЛКИ, 2014. С. 33–69.
13. Браун О.М., Кившарь Ю.С. Модель Френкеля – Конторовой. Концепции, методы, приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 536 с.
14. Справочник Шпрингера по нанотехнологиям. М.: Техносфера, 2010. Т. 2. 1040 с.
15. The mechanisms and applications of friction energy dissipation / Huan Liu [et al.] // Friction. 2023. V. 11. Iss. 6. P. 839–864.
16. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
17. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.
18. Физическое материаловедение. Т. 1. Физика твердого тела: учебник для вузов / под общ. ред. Б.А. Калина. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 764 с.
19. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин: учебное пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 264 с.
20. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.

ГЛАВА 7. ИЗНАШИВАНИЕ

Изнашивание определяется как «процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела» (ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения»). Необходимо уточнить, что изнашивание – это не просто процесс, а *случайный нестационарный процесс*. Случайный характер процесса изнашивания обусловлен влиянием на него многочисленных факторов, многие из которых сами носят случайный характер.

Случайный характер процесса изнашивания проиллюстрируем на типичном примере результатов испытания на изнашивание некоторого фрикционного узла (рис. 7.1). Количественной характеристикой процесса изнашивания служит линейный износ h . При испытании партии таких устройств получено несколько реализаций случайного процесса изнашивания. В результате для некоторого фиксированного момента времени t_i имеем распределение случайной величины h с функцией плотности вероятности $f(h)$ (рис. 7.1). Если для данного устройства предельное состояние определяется величиной предельного линейного износа $h_{\text{пред}}$, то срок службы этого фрикционного узла также будет подчиняться некоторому распределению с функцией плотности вероятности $f(T)$ (рис. 7.1).

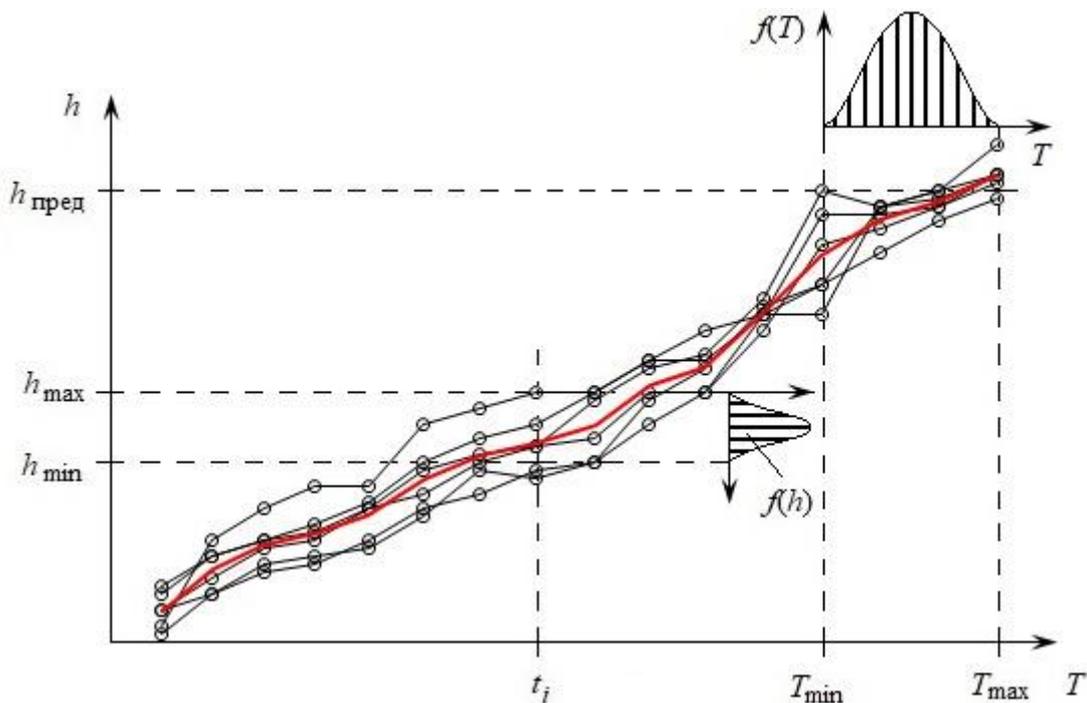


Рис. 7.1. Случайный характер процесса изнашивания:
—○— — реализации случайного процесса;
— — математическое ожидание случайного процесса

Основными характеристиками любого случайного процесса являются математическое ожидание и корреляционная функция. Математическое ожидание случайного процесса – неслучайная функция $m(t)$, которая при каждом значении аргумента t равна математическому ожиданию соответствующего сечения случайного процесса (см. рис. 7.1). Очевидно, что математическое ожидание нестационарного процесса является функцией времени. Корреляционная функция – функция двух аргументов t и t' , которая характеризует степень зависимости между двумя сечениями случайного процесса, относящимися к этим моментам времени. При $t = t'$ значение корреляционной функции равно дисперсии случайного процесса.

Очевидно, что детерминистские зависимости не могут адекватно описать поведение случайного процесса. Когда для прогнозирования величины износа в зависимости от различных факторов используются такие зависимости, надо понимать, что фактически они описывают поведение только математического ожидания случайного процесса изнашивания. Поэтому точность таких прогнозов принципиально невысока.

В заключение отметим, что аргументом случайной функции, описывающей процесс изнашивания, часто служит не время t , а путь трения L . При постоянной относительной скорости трущихся тел V эти величины прямо пропорциональны: $L = Vt$.

7.1. Количественные характеристики изнашивания

Стандартом определены две основных категории удельных характеристик изнашивания – скорость и интенсивность изнашивания.

Скорость изнашивания определяется как отношение величины износа, выраженное в установленных единицах, к интервалу времени Δt , в течение которого он возник. Например, линейная скорость изнашивания измеряется в метрах в секунду (м/с) и может быть выражена формулой

$$u_h = \Delta h / \Delta t,$$

где Δh – изменение соответствующего размера изнашиваемого тела, массовая скорость изнашивания измеряется в килограммах в секунду (кг/с):

$$u_m = \Delta m / \Delta t,$$

где Δm – изменение массы, и т.п.

Интенсивность изнашивания определяется как отношение величины износа, выраженное в установленных единицах, к обусловленному пути ΔL , на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы. Наиболее часто используются:

линейная интенсивность изнашивания с нулевой размерностью:

$$I_h = \Delta h / \Delta L;$$

объемная интенсивность изнашивания, измеряемая в квадратных метрах (м^2):

$$I_V = \Delta V / \Delta L;$$

массовая интенсивность изнашивания, измеряемая в килограммах на метр (кг/м):

$$I_m = \Delta m / \Delta L,$$

где Δh , ΔV и Δm – изменение линейного размера, объема и массы изнашиваемого тела соответственно.

Как в случае скорости изнашивания, так и в случае интенсивности изнашивания, если соответствующий интервал Δt или ΔL бесконечно мал, то говорят о мгновенных скорости и интенсивности изнашивания, в противном случае это средние скорость и интенсивность изнашивания на определенном интервале.

Величины интенсивности изнашивания связаны между собой очевидной зависимостью:

$$I_h = \frac{I_V}{A_T} = \frac{I_m}{\rho A_T},$$

где A_T – площадь трения; ρ – плотность материала изнашиваемой детали.

Износостойкость материала количественно оценивается величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

Относительная износостойкость материала равна отношению интенсивности изнашивания одного материала к интенсивности изнашивания другого в одинаковых условиях. Обычно один из материалов принимается за эталон.

Для расчетов технических изделий на надежность важны еще две характеристики изнашивания, которые определяет ГОСТ 27674-88:

предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части;

допустимый износ – значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность.

7.2. Стадии изнашивания

Изнашивание как типичный процесс деградации технического устройства на протяжении жизненного цикла изделия в общем случае проходит три стадии (рис. 7.2а). Кривая 1 иллюстрирует зависимость некоторого количественного параметра износа Y (это может быть линейный износ, объем или масса изношенного материала и т.п.) от времени, а кривая 2 – соответствующую зависимость скорости изнашивания $\dot{Y}(t) = \frac{dY}{dt}$. Вместо времени в качестве аргумента при постоянной относительной скорости трущихся поверхностей может использоваться величина пути трения. Вид зависимостей 1 и 2 при этом сохранится, изменится только масштаб по оси абсцисс.

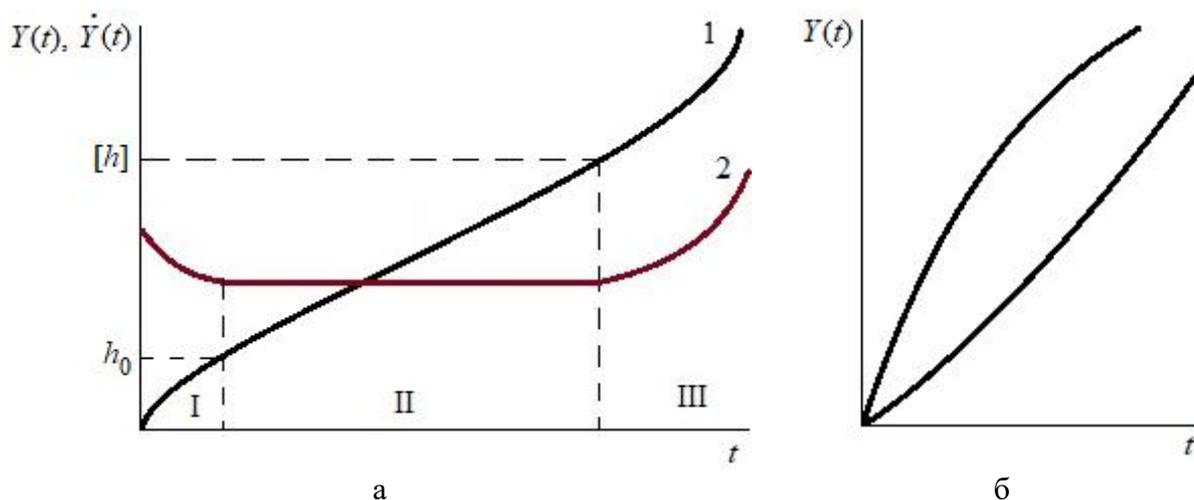


Рис. 7.2. Развитие процесса изнашивания во времени:
а – стадии изнашивания в течение жизненного цикла изделия;

1 – величина износа; 2 – скорость изнашивания;

б – возможные варианты зависимости интенсивности изнашивания от времени

Каждая стадия жизненного цикла на рис. 7.2а характеризуется характером зависимостей $Y(t)$ и $\dot{Y}(t)$: стадия I – приработка; стадия II – установившееся изнашивание; стадия III – катастрофическое изнашивание.

Стадия I (стадия приработки) имеет продолжительность, обычно составляющую незначительную долю от времени работы сопряжения, либо отсутствует вовсе (рис. 7.2б). Последний случай относится, в частности, к изнашиванию рабочих органов землеройной и строительно-дорожной техники или режущего инструмента.

Для узлов, у которых стадия приработки присутствует, приработка выражается в изменении микрогеометрии поверхностей трения и свойств по-верхностных слоев материалов контактирующих деталей. В результате

формирования характерного микрорельефа и вторичных структур различной природы на поверхностях трения минимизируются энергозатраты на трение, процесс изнашивания локализуется в тонком приповерхностном слое.

Скорость изнашивания в процессе приработки уменьшается (см. рис. 7.2а).

Экспериментально установлено, что по окончании приработки формируется практически новая шероховатость, не зависящая от первоначальной шероховатости, полученной при механической обработке, а зависящая от условий изнашивания. Эта шероховатость является оптимальной в данных условиях трения, так как обеспечивает минимальный коэффициент трения и минимальное изнашивание. Иногда ее называют равновесной. Равновесная шероховатость может быть как больше, так и меньше исходной. Она воспроизводится в дальнейшем в процессе нормального изнашивания.

Согласно ГОСТ Р 50740-95 «Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения», критериями окончания процесса приработки могут служить:

стабилизация скорости изнашивания (выход на прямолинейный участок кривой $h(t)$) (см. рис. 7.2а);

стабилизация момента трения, силы трения, коэффициента трения, температуры узла;

достижение минимума мощности холостого хода агрегата и др.

Для узлов, работающих в режиме трения со смазочным материалом, скорость изнашивания удобно контролировать с помощью неразрушающих физических методов анализа смазочного материала, таких как феррография, оптическая фотометрия и др.

Стадия II, наиболее продолжительная во времени, характеризуется небольшой и практически постоянной скоростью изнашивания. Для линейной характеристики износа (толщины изношенного слоя h) выражение для скорости изнашивания примет вид

$$u_h = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dL} \cdot \frac{dL}{dt} = I_h \cdot V,$$

где V – относительная скорость трущихся поверхностей.

Стадия установившегося изнашивания соответствует нормальной работе узла трения в период эксплуатации после приработки. Если количественный параметр износа достигает предельного значения (например, $h = [h]$), наступает предельное состояние, которое определяет срок службы изделия (см. рис. 7.2а).

Если величина износа линейно растет со временем или с увеличением пути трения ($h = u_h t$ или $h = I_h L$), то срок службы изнашивающихся деталей

$$T = \frac{1}{I_h V} \int_{h_0}^{[h]} dh = \frac{[h] - h_0}{I_h V},$$

где h_0 – суммарный износ на стадии приработки; $[h]$ – предельный износ (см. рис. 7.2а).

Стадия III – стадия катастрофического изнашивания. Узлы трения являются характерным примером изделий с постепенными отказами. В процессе эксплуатации с течением времени в результате негативного влияния внутренних и внешних факторов различной природы (агрессивного воздействия окружающей среды, повышения динамических нагрузок, роста температуры в контакте, изменения размеров деталей, истирания защитных слоев, деградации смазывающего материала и т.п.) скорость изнашивания возрастает и наблюдается катастрофический износ.

Для оценки надежности изделий по критерию износа большое значение имеет выбор величины предельного износа. Она не должна попадать в область катастрофического изнашивания (стадия III на рис. 7.2), но в то же время не должна занижаться, так как при этом ресурс изделия используется не полностью.

Величина предельного износа может назначаться из условия прочности деталей, из условия надежного функционирования механизма, выхода параметров механизма за допустимые пределы и т.п. [1]. Величина предельного износа может меняться для конкретных изделий от нескольких микрометров до долей и даже единиц миллиметров, как, например, для зубчатых колес или металлорежущего инструмента.

7.3. Основные виды изнашивания

Одна из возможных классификаций основных видов изнашивания приведена на рис. 7.3.

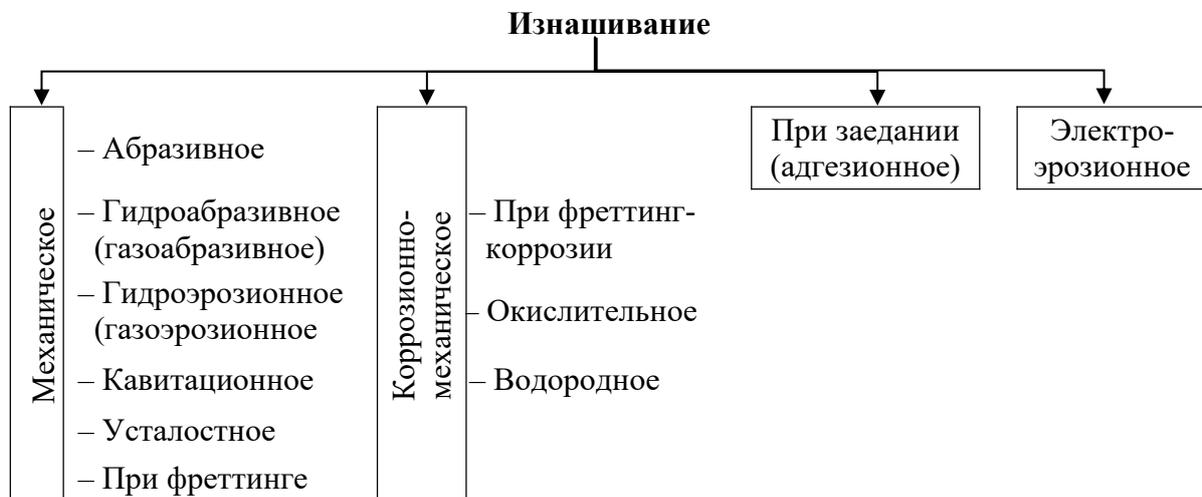


Рис. 7.3. Основные виды изнашивания

Из приведенной классификации видно, что изнашивание не всегда есть результат трения (например, кавитационное или гидроэрозионное).

Кратко охарактеризуем перечисленные на рис. 7.3 виды изнашивания.

7.3.1. Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание – один из наиболее распространенных видов изнашивания. Ему подвержены детали сельскохозяйственных, горных, дорожных, строительных, транспортных машин, металлургического и нефтегазопромыслового оборудования и др. Оно относится к механическим видам изнашивания и происходит в результате воздействия абразивных частиц. Эти частицы могут иметь внешнее происхождение (частицы грунта, горных пород, пыли) либо представлять собой фрагменты разрушенных оксидных пленок с поверхностей трущихся деталей, частицы износа, упроченные в результате наклепа, или твердые структурные составляющие материалов трущихся деталей.

Абразивное изнашивание может иметь большую скорость (например, до нескольких миллиметров в час для деталей землеройной техники) [2].

Абразивное изнашивание в свою очередь подразделяют на несколько разновидностей.

Изнашивание о закрепленный абразив происходит, когда абразивные частицы зафиксированы в какой-либо прочной основе. Это может быть монолитная порода, абразивная бумага, шлифовальный круг и т.п. Результат изнашивания зависит от прочностных характеристик абразива и изнашиваемого материала. Факторы, влияющие на износ о закрепленный абразив, указаны в табл. 7.1.

При изнашивании о закрепленный абразив следует принимать во внимание такое явление, как «засаливание» основы, в которой закреплен абразив. Это особенно наглядно проявляется в случае абразивных инструментов, таких как шлифовальные круги, ленты, абразивная бумага. Заключается это явление в том, что частицы мягкого материала заполняют пространство между абразивными частицами, вследствие чего скорость изнашивания существенно снижается.

Изнашивание в абразивной прослойке наблюдается, когда частицы абразива не закреплены и находятся в зазоре между контактирующими поверхностями. Частицы абразива могут внедряться в более мягкую поверхность (шаржировать ее), превращаясь в закрепленный абразив, могут перекачиваться в зазоре, деформируя более мягкие контактирующие детали.

Таблица 7.1. Факторы, влияющие на интенсивность абразивного изнашивания [3]

Фактор	Вид изнашивания				
	О закрепленный абразив	В абразивной прослойке	В абразивной массе	Гидроабразивное	Газоабразивное
Твердость абразива	+	+		+	+
Твердость изнашиваемого материала	+	+		+	+
Прочность абразива	+	+		+	
Прочность изнашиваемого материала	+	+		+	
Нормальная нагрузка	+	+	+		
Температура	+	+		+	+
Химическая агрессивность среды			+	+	
Относительная скорость частицы и детали			+	+	+
Форма абразивной частицы (окатанность)		+	+	+	+
Размер абразивной частицы			+	+	+
Масса частицы				+	+
Плотность материала частицы			+	+	+
Угол атаки частицы				+	+

Изнашивание в абразивной массе – вид изнашивания, которому подвергаются детали почвообрабатывающих и горных машин, растворо- и бетономешалок и т.п. Интенсивность изнашивания поверхности при трении в абразивной массе значительно ниже, чем при трении по закрепленному абразиву. Факторы, влияющие на износ в абразивной прослойке и в абразивной массе, также указаны в табл. 7.1.

Гидроабразивное изнашивание, как видно из названия, происходит в потоке жидкости, содержащей абразивные частицы. Этому виду изнашивания подвергаются детали горно-обогатительного оборудования, гидротурбин и др. Естественно, что износ в данном случае зависит от скорости и массы частиц и угла атаки (см. табл. 7.1). Жидкость также играет свою роль в процессе изнашивания. С одной стороны, она уносит абразивные частицы и охлаждает поверхность, с другой – может содержать химически агрессивные компоненты, вступающие в реакцию с материалом пары трения, а также при определенных условиях вызывать кавитационное изнашивание.

Газоабразивное изнашивание – распространенный вид изнашивания. Ему подвергаются любые детали, эксплуатируемые в запыленном потоке газа, в основном воздуха, – детали пескоструйных аппаратов, компрессоров, промышленных вентиляторов и воздухопроводов и т.д.

По своему механизму газоабразивное изнашивание имеет много общего с гидроабразивным. В первую очередь на величину износа влияют энергетические факторы (скорость и масса частиц), а также угол атаки. При малых углах атаки происходит удар частиц со скольжением, и интенсивность изнашивания в этом случае для многих материалов близка к интенсивности изнашивания о закрепленный абразив.

Характерной особенностью гидро- и газоабразивного изнашивания является образование волнистости с направлением волн перпендикулярно вектору скорости потока абразивных частиц. Такая волнистость возникает при малых углах атаки чаще всего при наличии завихрения потока.

Факторы, влияющие на гидро- и газоабразивный износ, приведены выше (см. табл. 7.1).

В общем случае абразивные частицы оказывают воздействие на изнашиваемую поверхность двумя способами – пластическим оттеснением материала (пропахиванием) и микрорезанием (отделением стружки). В первом случае отделение материала не происходит и износ выражается в образовании канавки с оттеснением материала в стороны. При микрорезании материал удаляется с поверхности изнашиваемой детали.

Переход от одного способа к другому зависит от соотношения глубины внедрения частицы h и ее радиуса r . Если это соотношение превосходит критическое значение, пластическое оттеснение сменяется микрорезанием. Критическое отношение определяется условием

$$\frac{h}{r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-2\tau}{\sigma_T} \right),$$

где τ – касательные напряжения; σ_T – предел текучести изнашиваемого материала.

Как видно из табл. 7.1, практически все виды абразивного изнашивания зависят от соотношения твердостей абразива и изнашиваемого материала. Эта зависимость схематически изображена на рис. 7.4.

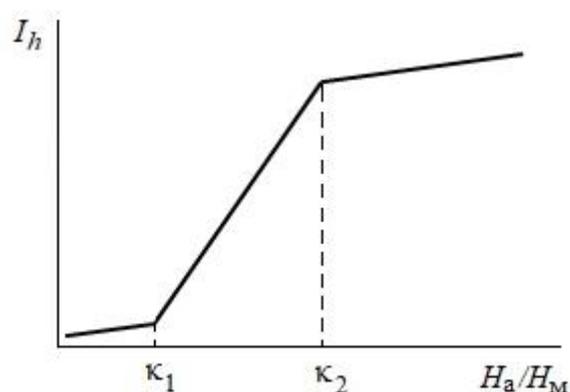


Рис. 7.4. Зависимость интенсивности абразивного изнашивания

от соотношения твердостей абразива H_a и изнашиваемого материала H_m

Абразивное изнашивание слабо зависит от соотношения твердостей абразива и изнашиваемого материала до тех пор, пока твердость абразива не превзойдет твердость изнашиваемого материала в k_1 раз (см. рис. 7.4). После этого интенсивность изнашивания существенно растет с ростом соотношения H_a/H_m . Однако начиная с некоторого соотношения $H_a/H_m = k_2$ его величина снова практически перестает оказывать влияние на процесс изнашивания. Ориентировочно $k_1 \approx 1$; $k_2 \approx 1,5$.

7.3.2. Адгезионное изнашивание

Адгезионное изнашивание связано с образованием и разрушением адгезионных и когезионных связей между контактирующими поверхностями (*схватывание при трении*). ГОСТ 27674-88 определяет схватывание как «явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении». Наиболее жесткое проявление схватывания трущихся поверхностей – *заедание*. Тот же стандарт определяет заедание как «процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала». При этом «заедание может завершаться прекращением относительного движения». Из этих определений становится ясно, что адгезионное изнашивание является одним из наиболее опасных и разрушительных видов изнашивания.

Адгезионному изнашиванию способствуют определенные внешние факторы, увеличивающие вероятность образования прочных адгезионных связей. Так, оно проявляется в космической и вакуумной технике, в оборудовании ядерных реакторов, в тяжелонагруженных узлах трения (зубчатых передачах, кулачках, шарнирных соединениях, деталях цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и т.п.).

Процесс адгезионного изнашивания может сопровождаться переносом материала с одного тела на другое. Так происходит, если когезионные связи внутри материала одного из трущихся тел оказываются слабее образовавшихся в контакте адгезионных связей. Единого мнения среди трибологов по поводу критерия склонности металлических пар трения к схватыванию не существует. Одни считают таким критерием взаимную растворимость металлов (чем она выше, тем больше вероятность схватывания), другие – соотношение атомных диаметров металлов (чем ближе атомные диаметры, тем больше вероятность схватывания). В любом случае вероятность схватывания тем меньше, чем больше различаются строение и свойства материалов контактирующих тел.

Примерами наиболее склонных к схватыванию, помимо пар идентичных (одноименных) металлов, могут служить следующие совместимые

металлические пары: Fe-Cu, Fe-Ni, Cu-Ni, Ag-Au, Ag-Pt. Примеры менее склонных к схватыванию (частично совместимых) пар: Ag-Mo, Au-Mo, Cu-Ti, Al-Zn. Низкой склонностью к схватыванию обладают несовместимые пары, например Fe-Ag, Cu-Mo, Ag-W.

Для отделения частицы износа необходимо выполнение определенного условия, которое иногда называют критерием Рабиновича (*E. Rabinowicz*). Его физический смысл заключается в следующем [4]. Образование частицы происходит на пятне фактического контакта двух выступов шероховатости. В процессе упругой контактной деформации была накоплена энергия

$$U_{упр} \approx \frac{\sigma_0^2}{2G} d^3,$$

где σ_0 – критическое напряжение (предел текучести, предел прочности); G – модуль сдвига; d – диаметр контакта выступов. Отделение частицы износа произойдет только в том случае, если запас упругой энергии $U_{упр}$ превзойдет энергию адгезии $U_{адг} \approx \Delta\gamma d^2$, где $\Delta\gamma$ – удельная работа адгезии (см. разд. 2.3). Этим условием определяется минимальный размер частиц износа d_{min} :

$$d_{min} = \frac{2\Delta\gamma G}{\sigma_0^2}.$$

7.3.3. Усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание является результатом многократного циклического изменения напряжения в контакте при скольжении или качении.

Типичные узлы трения, подверженные усталостному изнашиванию, – зубчатые передачи, подшипники качения и скольжения, кулачковые механизмы, контакт «колесо – рельс».

Под действием циклического напряжения в поверхностных слоях материалов трущихся тел возникают микротрещины, при смыкании которых образуется частица износа. В результате на поверхности появляется множество мелких углублений. Этот процесс называют *питтингом*. Особенно он характерен для трения качения или качения с проскальзыванием (шарико- и роликоподшипники, зубья шестерен).

Износостойкость деталей при усталостном изнашивании зависит от нормальной нагрузки, свойств материала (твердость), температуры, шероховатости контактирующих поверхностей (рис. 7.5) [2]. Смазка снижает контактные напряжения и уменьшает усталостный износ.

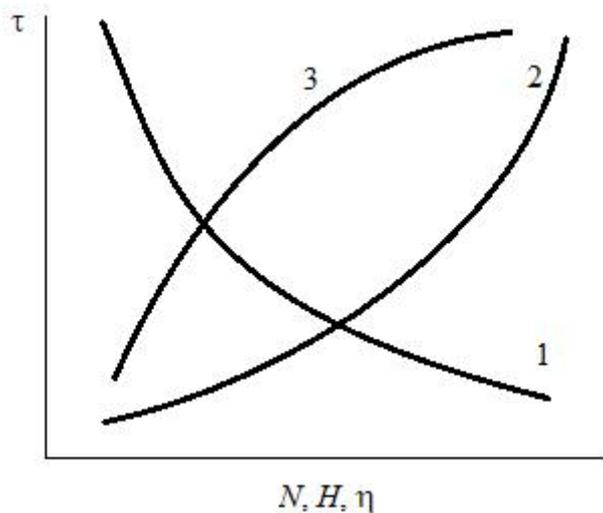


Рис. 7.5. Характер зависимости времени наработки τ до появления усталостного выкрашивания от нормальной нагрузки N (1); твердости материала H (2); вязкости смазочного материала η (3)

7.3.4. Фреттинг-изнашивание и фреттинг-коррозия

Изнашивание при фреттинге наблюдается в номинально неподвижных соединениях, испытывающих тем не менее циклические микроперемещения амплитудой менее 100 мкм. Почти всегда механическое изнашивание при фреттинге сопровождается коррозионными процессами в контакте, так как микроперемещения вызывают разрушение защитной поверхностной пленки и активизируют химические реакции в зоне контакта.

Типичными примерами соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию и фреттинг-коррозии, служат соединения с натягом, заклепочные, болтовые, шлицевые, шпоночные соединения, рессоры, электрические контактные соединения.

Опасность этого вида изнашивания объясняется тем, что из-за малой амплитуды тангенциальных перемещений продукты износа не удаляются из зоны контакта и, действуя как абразив, еще более усиливают изнашивание поверхности. Невозможность визуального контроля зоны контакта затрудняет мониторинг состояния контактного соединения в период эксплуатации.

Образование участков микропроскальзывания в контакте выступов шероховатости описано в разд. 6.2.

На рис. 7.6 представлена так называемая карта механизмов фреттинг-изнашивания, представляющая собой графические зависимости между нормальной нагрузкой, приложенной к контакту, и амплитудой тангенциального смещения. Линии графических зависимостей разделяют области, соответствующие основным механизмам процесса изнашивания.

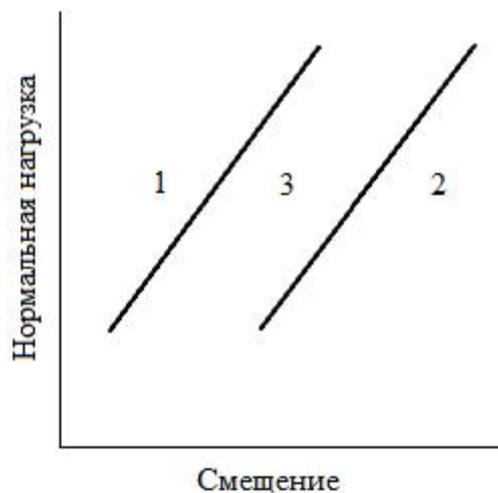


Рис. 7.6. Карта механизмов фреттинг-изнашивания (логарифмический масштаб)

Область малых смещений и больших сжимающих нагрузок (область 1) – область сцепления. Здесь отсутствует относительное проскальзывание контактирующих поверхностей. Область относительно больших смещений и малых сжимающих нагрузок (область 2) – область существенного проскальзывания, где относительное проскальзывание наблюдается на всех единичных площадках контакта неровностей контактирующих поверхностей, т.е. фактически эта область соответствует так называемому предварительному смещению контакта. Между областями 1 и 2 располагается область 3 – область частичного проскальзывания (см. рис. 7.6).

Различным областям на карте фреттинг-изнашивания, как уже отмечалось, соответствуют разные физические механизмы, контролирующие процесс изнашивания. В области сцепления (область 1) износ практически отсутствует на протяжении миллионов циклов деформации контакта. В области частичного проскальзывания (область 3) образуются усталостные трещины на площадках контакта и в результате многократных деформаций происходит отделение частиц износа. В области существенного проскальзывания (область 2) возникновение усталостных трещин уже не играет главенствующей роли, а изнашивание носит обычный для трения скольжения характер.

Механизм фреттинг-изнашивания определяет срок службы контактного соединения. На рис. 7.7 схематически изображена его зависимость от амплитуды перемещений с указанием механизмов фреттинг-изнашивания. Наименьший срок службы ожидается у соединений, работающих в условиях перехода от частичного к существенному проскальзыванию. Этот факт можно объяснить тем, что на данном участке диапазона относительных тангенциальных смещений образование частиц износа происходит достаточно интенсивно, но удаление их из области

контакта еще затруднено. Располагая картой механизмов фреттинг-изнашивания для данного соединения, можно выбрать эксплуатационные режимы (в первую очередь нормальную нагрузку), уводящие соединение из нежелательной области.

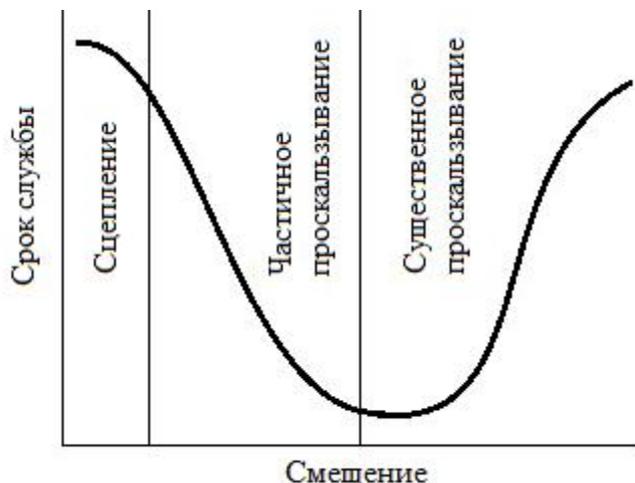


Рис. 7.7. Схематическая зависимость срока службы контактного соединения при фреттинг-изнашивании от амплитуды тангенциального смещения

В электрических контактах фреттинг-изнашивание приводит к росту контактного электросопротивления вплоть до десятков килоом, т.е. практически до потери проводимости контакта (рис. 7.8) [5]. Сначала сопротивление контакта немного падает (очевидно, вследствие разрушения непроводящих пленок и образования металлического контакта), однако затем продукты изнашивания, накапливаясь в зоне контакта, образуют непроводящий слой, что вызывает существенный рост сопротивления.



Рис. 7.8. Характер зависимости контактного электросопротивления от числа циклов тангенциального смещения (логарифмический масштаб)

7.3.5. Эрозионное и кавитационное изнашивание

Гидроэрозионное и газоэрозионное изнашивание происходит в потоке жидкости или газа без участия абразивных частиц. Очевидно, что эти виды изнашивания так же, как и гидро- и газоабразивное, не связаны с трением контактирующих деталей. Они характерны для лопаток турбин, трубопроводов, пневмотранспорта. Основной механизм изнашивания – динамическое воздействие струи жидкости или газа. При этом возможны вырывы микрообъемов или групп зерен металлов с поверхности. В пластичных материалах под воздействием струи сначала происходит наклеп отдельных участков материала, а когда способность к упрочнению исчерпывается, они разрушаются.

Кавитационное изнашивание наблюдается при быстром относительном движении жидкости и поверхности твердого тела [3]. Если в потоке жидкости происходит образование микропузырьков, заполненных паром этой жидкости, то при попадании их в область более высокого давления они начинают сжиматься. Если давление достигнет давления конденсации паров, пар переходит обратно в жидкое состояние. В пузырьке фактически возникает вакуум, под действием давления жидкости пузырек схлопывается, происходит микровзрыв и образуется ударная волна в жидкости. Многократные ударные воздействия на поверхность тела, находящегося в такой жидкости, вызывают усталостное разрушение материала.

7.3.6. Окислительное и водородное изнашивание

Окислительное изнашивание – распространенный вид коррозионно-механического изнашивания, заключающийся в образовании на поверхности трущихся деталей окисной пленки и ее последующем разрушении при трении. Трение приводит к интенсификации процесса окисления, этому способствуют передеформирование материала и высокие температуры. Окисные пленки защищают металл и предотвращают схватывание. При трении в условиях смазки окисление может происходить кислородом, растворенным в масле. При установившемся режиме процессы окисления и разрушения пленки находятся в равновесии. При этом собственно окислительный износ невелик, так как разрушаются только тонкие окисные пленки, но твердые частицы износа в виде окислов вызывают дополнительный абразивный износ. Повышение температуры ускоряет образование оксидных пленок, а вибрация способствует их разрушению.

Водородный износ – результат поглощения водорода металлическими деталями пары трения. Источником водорода в первую очередь являются смазочные материалы, топливо, пластики и вода. Водород также

может содержаться в самом металле после термообработки, выплавки и т.п. Благодаря малым размерам атома водород обладает большой проникающей способностью в кристаллическую решетку металла. С ростом концентрации водорода в поверхностных слоях металла возникают напряжения, превышающие предел прочности металла, и происходит его хрупкое растрескивание и разрушение. Водородному изнашиванию подвержены детали топливной аппаратуры, тормозные колодки.

7.3.7. Электроэрозионное изнашивание

Электроэрозионное изнашивание отличается от остальных видов изнашивания своими механизмами, проявлениями и характеристиками, поэтому выделено в самостоятельный вид.

Электрическая эрозия относится к одному из основных механизмов изнашивания электроконтактных соединений и выступает как негативный фактор, снижающий надежность и долговечность электрического оборудования. Она проявляется во всех видах электроконтактных соединений – в скользящих контактах (контакте «щетка – коллектор», контактный провод – токосъемник, контактах потенциометров и т.п.), в разрывных контактах (контактах реле, выключателях, контакторах и т.д.), в разъемных и разборных контактных соединениях (электрических разъемах, контактах шинпроводов, кабельных наконечников и т.п.). Практически всегда электрической эрозии сопутствует механический износ в том или ином виде. В зависимости от условий работы контактного соединения преобладать может как электрический, так и механический износ (рис. 7.9) [5].

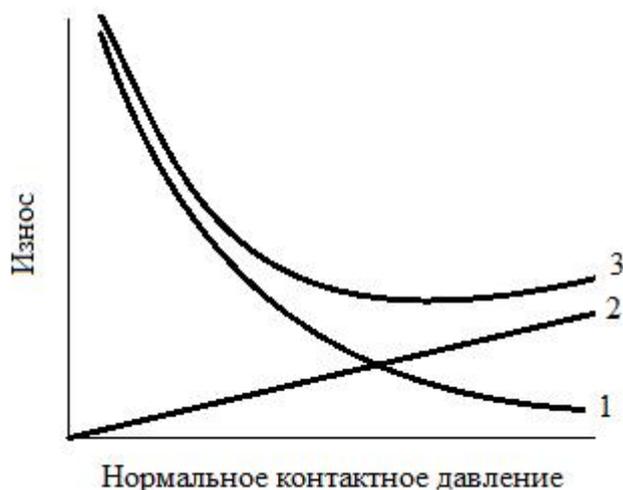


Рис. 7.9. Типичный вид зависимости износа электрощеток от нормального давления в контакте:
1 – электрический; 2 – механический; 3 – общий

Принято различать несколько видов электрической эрозии [6, 7]. Один из них – эрозия под действием импульсных электрических разрядов. Под общим термином «импульсный» обычно понимается разряд малой длительности. В зависимости от конкретных условий он может принимать форму искрового или дугового разряда, переходя от одной формы к другой. Для искрового разряда характерны очень малая длительность (10^{-7} – 10^{-8} с) и достаточно большая разность потенциалов между электродами; с увеличением длительности искровой разряд переходит в дуговой [6, 7].

Существует несколько теорий, объясняющих механизмы электроэрозионного изнашивания. Одной из признанных теорий электрической эрозии металлов является тепловая [6], согласно которой в результате воздействия концентрированного потока энергии материал электродов в приповерхностном слое плавится и частично испаряется. Расплавленный металл полностью или также частично удаляется с электрода. В импульсном разряде не вся энергия, подводимая к контакту, расходуется на эрозию материала электродов. Часть энергии переходит во внутреннюю энергию плазмы, образующейся в межконтактном зазоре, отводится в объем электродов за счет теплопроводности и т.д. [6].

Однако даже в рамках тепловой теории электроэрозионного изнашивания нет единства в подходах к интерпретации экспериментальных результатов и их теоретическому обоснованию.

Количественные характеристики электроэрозионного изнашивания. Многочисленными исследованиями установлено, что масса удаленного материала в процессе электроэрозионного изнашивания пропорциональна числу циклов коммутации, энергии, подводимой к контакту, и количеству электричества (заряду), прошедшему через контакт за один цикл. Соответственно, в литературе приводятся различные величины удельного износа (удельной эрозии).

Объемная и массовая эрозия в расчете на один цикл:

$$I_V = V/n_{\text{ц}}, \text{ м}^3/\text{цикл}; \quad I_m = m/n_{\text{ц}}, \text{ кг}/\text{цикл},$$

где V и m – объем и масса материала, потерянные электродами в результате эрозии за определенное количество циклов $n_{\text{ц}}$.

Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу коммутируемой за один цикл энергии W :

$$I_V = V/(n_{\text{ц}}W), \text{ м}^3/\text{Дж}; \quad I_m = m/(n_{\text{ц}}W), \text{ кг}/\text{Дж}.$$

Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу заряда Q , прошедшего через контакт:

$$I_V = V/(n_{\text{ц}}Q) \text{ м}^3/\text{Кл}; \quad I_m = m/(n_{\text{ц}}Q) \text{ кг}/\text{Кл},$$

где $Q = \int_0^{t_{\text{и}}} i dt$; i – ток через контакт; $t_{\text{и}}$ – длительность импульса.

Критерий электроэрозионной стойкости. При выборе материала для контакт-деталей электроконтактных устройств полезно опираться на количественный критерий, позволяющий провести оценку его электроэрозионной стойкости в сравнении с другими вариантами. Один из таких критериев – известный критерий Палатника [7], который можно записать в виде

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{\lambda c_{\text{уд}} d},$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала электрода; λ – теплопроводность; $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость; d – плотность. В таком виде критерий имеет размерность величины $q \sqrt{t}$, где q – плотность потока энергии; t – время. Физический смысл критерия в том, что он позволяет оценить время, необходимое для нагревания материала до температуры плавления при данной плотности потока энергии:

$$t_{\text{пл}} = k \frac{\Pi^2}{q^2},$$

где k – безразмерный коэффициент.

Критерий Палатника характеризует износостойкость материала в условиях искрового разряда. Очевидно, что чем больше величина критерия, тем выше эрозионная стойкость материала (меньше величина износа).

Если в контакте преобладает дуговая форма импульсного разряда, рекомендуется применять другой критерий [7]:

$$R_{\text{эп}} = \frac{c_{\text{уд}} T_{\text{пл}}}{k_{\text{в}} U_{\text{э}}},$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент выброса материала; $U_{\text{э}}$ – эквивалентное приэлектродное падение напряжения.

Выбор материала для электрконтактного соединения осложняется тем, что наряду с износостойкостью материал должен обладать достаточной проводимостью и небольшим контактным сопротивлением (рис. 7.10) [5].

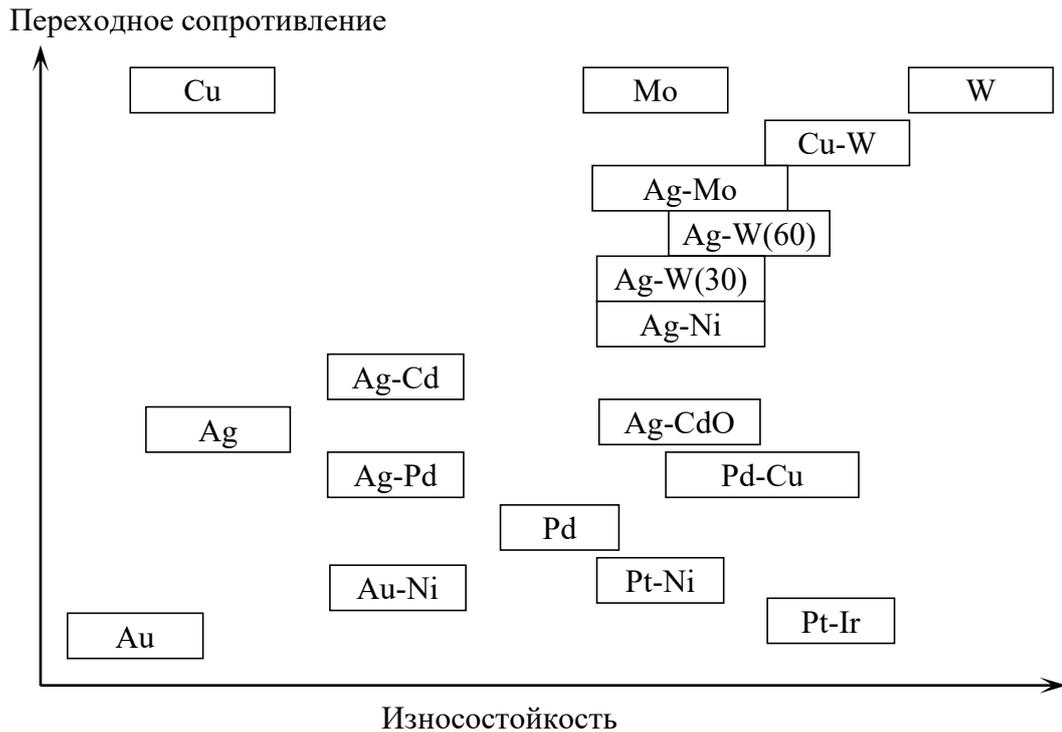


Рис. 7.10. Соотношение износостойкости и переходного сопротивления материалов для разрывных контактов

7.4. Аналитические зависимости для прогнозирования износа

7.4.1. Уравнение Арчарда

Рассмотрим формирование частицы износа при *абразивном изнашивании* (рис. 7.11а). Острые абразивные частицы моделируются коническими или пирамидальными телами, внедряющимися в изнашиваемую поверхность под действием нормальной силы. При перемещении на расстояние Δx i -я частица вытеснит объем материала (затемненная область на рис. 7.11а) $\Delta V_i \propto ah\Delta x$ или $\Delta V_i \propto a^2 \text{tg}\varphi \Delta x$, где φ – угол наклона боковых сторон частицы. Нормальная нагрузка на i -ю частицу уравнивается реакцией деформированного материала $N_i \propto p_r a^2$, где p_r – фактическое давление в контакте частицы с материалом изнашиваемой поверхности. Тогда для объема i -й частицы износа можем записать $\Delta V_i \propto \frac{N_i}{p_r} \text{tg}\varphi \Delta x$. Общий объем вытесненного материала при смещении поверхностей на расстояние Δx составляет

$$\Delta V = \sum \Delta V_i = k \frac{N}{p_r} \bar{\text{tg}}\varphi \Delta x,$$

где $N = \sum N_i$ – нормальная нагрузка на контакт; $\bar{\text{tg}}\varphi$ – среднее значение $\text{tg}\varphi$ для всех абразивных частиц. Объединив коэффициент k и $\bar{\text{tg}}\varphi$ в единый коэффициент пропорциональности, получим формулу для объемной интенсивности изнашивания $V/\Delta x$:

$$I_V = \frac{\Delta V}{\Delta x} = K \cdot \frac{N}{p_r}, \quad (7.1)$$

где коэффициент K называют коэффициентом изнашивания.

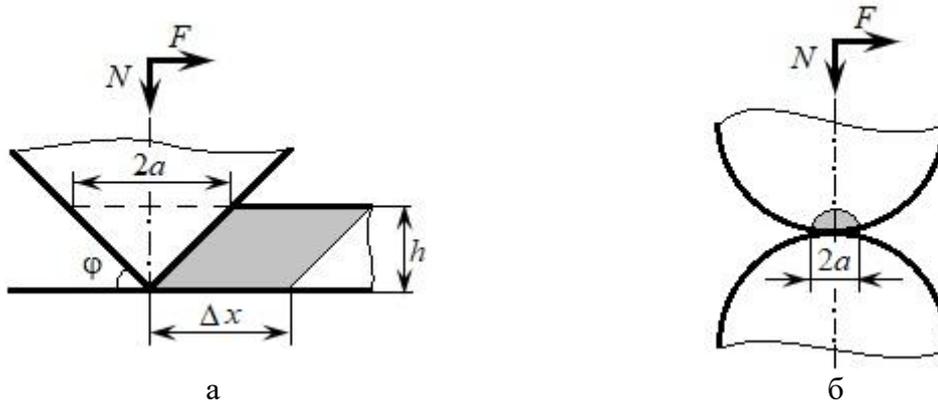


Рис. 7.11. Формирование частицы износа:
а – при абразивном изнашивании; б – адгезионном изнашивании

Выражение (7.1) называют уравнением Арчарда или Хольма – Арчарда (*R. Holm, J. Archard*), хотя наши соотечественники М.М. Хрущев и М.А. Бабичев в результате большой серии исследований абразивного изнашивания в 40-х – первой половине 50-х годов прошлого века пришли к такой же зависимости⁷.

Уравнение (7.1) – одна из сотен аналитических зависимостей для описания процесса изнашивания, часто цитируемая до настоящего времени, хотя была предложена впервые в середине прошлого века.

В качестве величины фактического давления обычно используют твердость (микротвердость) изнашиваемого материала H .

Коэффициент изнашивания для металлов при изнашивании закрепленным абразивом имеет величину порядка $(5-50) \cdot 10^{-3}$, при изнашивании свободным абразивом – примерно на порядок меньше.

К уравнению Арчарда можно прийти иным путем [8]. Объемная интенсивность изнашивания $I_V = \frac{\Delta V}{\Delta x}$ имеет размерность площади, как и отношение $\frac{N}{p_r} = A_r$ (фактическая площадь контакта). Безразмерный коэффициент изнашивания есть отношение этих площадей.

⁷ Статья Arcard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces опубликована в 1953 году в Journal of Applied Physics. V. 24. No. 8.

Более глубокая физическая интерпретация уравнения Арчарда заключается в следующем [4]. Поскольку величину $\text{tg}\varphi$ можно рассматривать как деформационную составляющую коэффициента трения (см. разд. 6.3), формулу (7.1) можно записать в виде

$$\Delta V = k \frac{N}{p_r} \overline{\text{tg}\varphi} \Delta x = k \frac{f_{\text{деф}} N \Delta x}{p_r} = k \frac{F_{\text{тр}} \Delta x}{p_r} = k \frac{A_{\text{тр}}}{p_r},$$

где $A_{\text{тр}}$ – работа, затраченная на преодоление сил трения. Таким образом, уравнение Арчарда подразумевает пропорциональность изношенного объема затраченной при трении работе.

Формирование частицы износа при *адгезионном изнашивании* показано схематически на рис. 7.11б. В случае отделения частицы износа (затемненная область на рис. 7.11б) ее средний объем $\Delta V_i \approx \frac{2}{3} \pi a^3$, где a – средний радиус контакта (считаем форму частицы износа близкой к полусферической). Число контактирующих выступов $n_r = \frac{A_r}{\pi a^2} = \frac{N}{p_r \pi a^2}$, где A_r – фактическая площадь контакта; N – нормальная нагрузка. Поскольку не каждое контактирование оканчивается отделением частицы износа, введем вероятность отделения частицы w и окончательно получим

$$\Delta V = \Delta V_i w n_r = \frac{2}{3} \pi a^3 w \frac{N}{p_r \pi a^2} = \frac{2}{3} w a \frac{N}{p_r}.$$

Учитывая, что отделение частицы износа происходит на пути трения $\Delta x = 2a$, для объемной интенсивности изнашивания получаем формулу

$$I_V = \frac{\Delta V}{\Delta x} = K \frac{N}{p_r},$$

которая имеет тот же вид, что и уравнение (7.1) при $K = w/3$.

Величину фактического давления p_r также обычно принимают равной твердости (микротвердости). Так как $p_r \leq H$, это предположение выливается в завышенную оценку интенсивности изнашивания. Для упругого контакта фактическое давление логичнее принять равным упругой твердости (см. разд. 5.4).

Помимо абразивного и адгезионного изнашивания, уравнение Арчарда применимо к другим его видам:

для коррозионно-механического изнашивания [9] согласно формуле (7.1) с коэффициентом K , зависящим от скорости окисления материала, диаметра пятен контакта, толщины окисного слоя;

для граничного трения [2] согласно формуле (7.1) с коэффициентом $K = \alpha K_{\text{и}} \gamma$, где α – вероятность металлического контакта с разрушением поверхностной пленки; $K_{\text{и}}$ – коэффициент изнашивания несмазанной

поверхности; $\gamma = (1 + 3f)^{\frac{1}{2}}$ – коэффициент, характеризующий изменение фактического давления под действием касательных напряжений (f – коэффициент трения).

Значение коэффициента изнашивания K в уравнении Арчарда определяется в основном экспериментально. В справочной литературе его величины приводятся в двух вариантах: в зависимости от материалов трущихся деталей [8] (рис. 7.12) и от условий трения (рис. 7.13) [10].

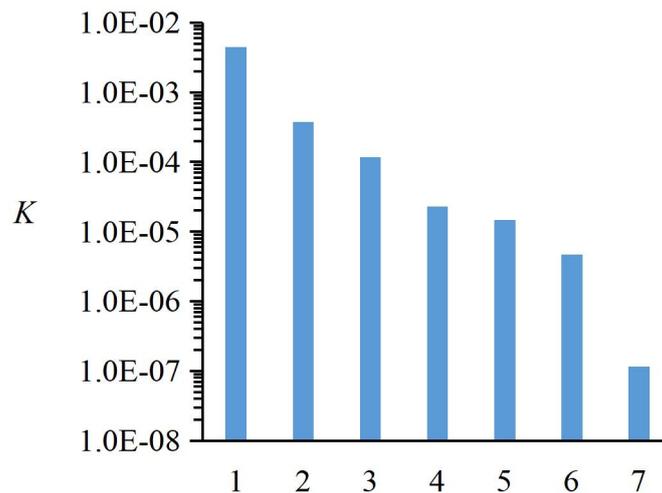


Рис. 7.12. Значения коэффициента изнашивания K в зависимости от материалов трущихся деталей:

- 1 – малоуглеродистая сталь; 2 – латунь; 3 – инструментальная сталь;
4 – политетрафторэтилен (фторопласт); 5 – нержавеющая сталь;
6 – полиметилметакрилат; 7 – полиэтилен

На рис. 7.13 приведены интервалы возможных значений коэффициента изнашивания. Для практических целей удобнее ориентироваться на средние значения коэффициента изнашивания (табл. 7.2) [4, 10].

Таблица 7.2. Ориентировочные значения коэффициента изнашивания

<i>Адгезионное изнашивание</i>				
Условия трения	Материалы пар трения			
	Идентичные	Совместимые	Частично совместимые	Несовместимые
Без смазочного материала	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Плохая смазка	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
Хорошая смазка	10^{-4}	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
<i>Абразивное изнашивание</i>				
О закрепленный абразив	$3 \cdot 10^{-2}$			
В абразивной прослойке	$2 \cdot 10^{-3}$			

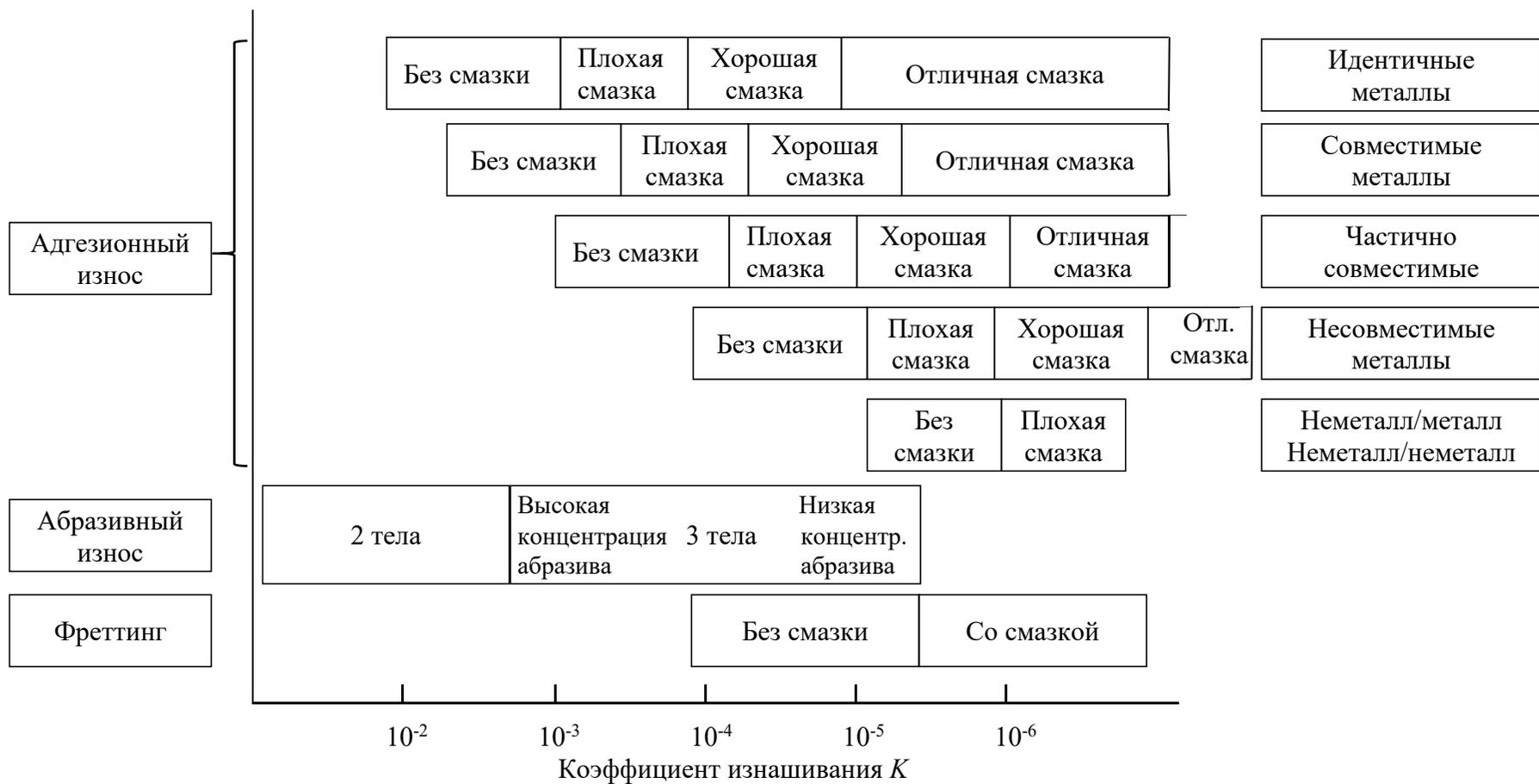


Рис. 7.13. Значения коэффициента изнашивания в зависимости от условий изнашивания

7.4.2. Расчет усталостного износа по И.В. Крагельскому

При усталостном изнашивании линейная интенсивность изнашивания может быть рассчитана по формуле [2]

$$I_h = \frac{0,35}{(v+1)n_{ц}} \cdot \frac{p_n}{p_r} \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (7.2)$$

где v – показатель степени в уравнении опорной кривой (см. разд. 3.4); $n_{ц}$ – число циклов нагружения до усталостного разрушения деформируемого объема материала; p_n и p_r – номинальное и фактическое контактные давления; δ – максимальная деформация контакта (см. разд. 5.2); r – средний радиус вершин выступов шероховатости (см. разд. 3.5). Поскольку типичные значения параметра $v = 2-3$, уравнение (7.2) можно записать в более простом виде:

$$I_h \approx \frac{0,1}{n_{ц}} \cdot \frac{p_n}{p_r} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{r}}.$$

Число циклов деформации до разрушения рассчитывается в зависимости от характера контакта:

$$n_{ц} = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^{t_y} & \text{– упругий контакт,} \\ \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}\right)^{t_{п}} & \text{– пластический контакт,} \end{cases}$$

где σ_0 – прочность при однократном нагружении; σ – действующее напряжение; ε_p – относительная деформация при разрыве; ε – действующее относительное удлинение. Действующее напряжение $\sigma = k_0 f_a p_r$, где коэффициент $k_0 = 5$ и $k_0 = 3$ для хрупких и эластичных тел соответственно; f_a – адгезионная составляющая коэффициента трения. Показатели степени $2 < t_y < 12$; $1 < t_{п} < 3$ обычно определяются экспериментально.

Уравнению (7.2) легко придать вид уравнения Арчарда (7.1). Так как $I_h = \frac{I_V}{A_T}$ и $p_n = \frac{N}{A_n}$, то при условии $A_T = A_n$ уравнение (7.2) примет вид

$$I_V = \frac{0,35}{(v+1)n_{ц}} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{r}} \cdot \frac{N}{p_r} = K \frac{N}{p_r}.$$

7.4.3. Прогнозирование износа с помощью безразмерных критериев (факторов изнашивания)

Многочисленные эксперименты подтверждают две принципиальные зависимости, декларируемые уравнением Арчарда: пропорциональность величины износа нормальной нагрузке и его обратную пропорциональность твердости изнашиваемого материала. Последнее утверждение эквивалентно утверждению о прямой пропорциональности износостойкости материала его твердости. В то же время в экспериментах наблюдаются и более сложные, чем линейные, зависимости $I_V(N)$ и $I_V(H)$.

Ю.Н. Дроздов [11] предложил более общий способ количественного описания характеристик износа в виде критериальных зависимостей:

$$I_h = I_h(\Phi_a, \Phi_{cm}, \Phi_y, \Phi_{ш}),$$

где Φ – безразмерные комплексы (критерии) величин, влияющих на характеристики изнашивания. В частности, предлагаются следующие критерии:

критерий нагруженности контакта Φ_a :

$$\Phi_a = \frac{p_n}{H}, \quad \Phi_a = \frac{fp_n}{H},$$

где p_n – номинальное давление; f – коэффициент трения; H – твердость (микротвердость);

критерий смазочной способности Φ_{cm} :

$$\Phi_{cm} = \left(\frac{h_{cm}}{D}\right),$$

где h_{cm} – толщина смазочного слоя; D – характерный размер (например, средний размер абразивной частицы или эквивалентная высота

шероховатости $R_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$);

критерий усталостной прочности Φ_y :

$$\Phi_y = \frac{\xi p_n}{\sigma_0},$$

где ξ – коэффициент; σ_0 – предел усталостной прочности материала;

критерий шероховатости $\Phi_{ш}$:

$$\Phi_{ш} = \frac{Rz}{r},$$

где Rz – максимальная высота профиля шероховатости (см. разд. 3.3.1);
 r – средний радиус кривизны вершин выступов шероховатости (см. разд. 3.5).

Характер зависимости интенсивности изнашивания от перечисленных критериев иллюстрируется рис. 7.14.

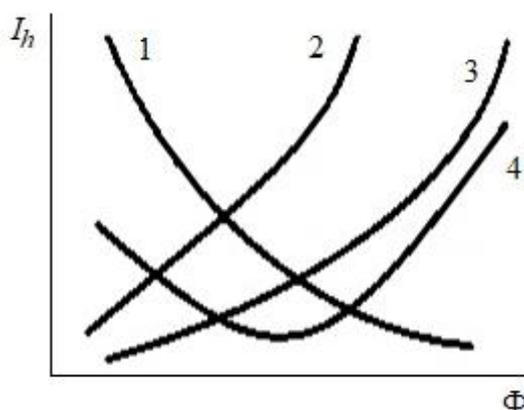


Рис. 7.14. Характер зависимостей интенсивности изнашивания от безразмерных критериев:

$$1 - I_h = I_h(\Phi_{см}); \quad 2 - I_h = I_h(\Phi_a); \quad 3 - I_h = I_h(\Phi_y); \quad 4 - I_h = I_h(\Phi_{ш})$$

Зависимости $I_h(\Phi)$ в общем виде представляют собой произведение степенных функций, аргументы которых – соответствующие критерии:

$$I_h = k \left(\frac{p_n}{H} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{h_{см}}{D} \right)^{m_2} \cdot \left(\frac{\xi p_n}{\sigma_0} \right)^{m_3} \cdot \left(\frac{Rz}{r} \right)^{m_4}.$$

Нетрудно видеть, что если ограничиться первым сомножителем в этой формуле, включив остальные в коэффициент K , то мы придем к зависимости вида (7.2), только в более общем степенном виде.

В зависимость $I_h(\Phi)$ могут включаться и другие критерии, например критерий $\left(\frac{RT}{Q_a} \right)$, характеризующий адсорбцию смазочного материала, где R – газовая постоянная; T – абсолютная температура в контакте; Q_a – теплота адсорбции смазочного материала (см. разд. 2.4).

7.4.4. Расчет электроэрозионного износа

Изнашивание электрических контактов описывается с учетом его специфики иными показателями и зависимостями.

При малых токах преобладает так называемая *мостиковая эрозия*, которая описывается приближенной зависимостью [12]:

$$G = aI^\alpha, \quad (7.3)$$

где G – весовой или объемный износ в расчете на одну коммутацию; a – коэффициент износа; I – сила тока в момент разрыва мостика.

Мостиковая эрозия контактов обусловлена разрушением жидкого металлического мостика в контакте двух выступов шероховатости в результате выделения энергии. Для типичных электроконтактных материалов (Au, Ag, Pt, Pd) $\alpha = 2$, $a = (0,1-1) \cdot 10^{-18} \text{ м}^3\text{А}^{-2}$.

При искровом разряде массовый или объемный износ G пропорционален величине коммутируемого заряда q :

$$G = \gamma_{\text{и}}q,$$

где $\gamma_{\text{и}}$ – коэффициент, характеризующий данный материал.

В случае дугового разряда при токах от 10 до 400 А массовый износ за одну коммутацию можно рассчитать по формуле (7.3) при $\alpha = 2$, $a = (0,2-4) \cdot 10^{-12} \text{ кг/А}^2$ для серебра и $a = (0,8-6) \cdot 10^{-12} \text{ кг/А}^2$ для меди.

Износ электрощеток в скользящем контакте при больших токах имеет вид [5]

$$m = kVIt,$$

где m – массовый износ; V – скорость скольжения; I – сила тока; t – время; k – коэффициент износа.

Список литературы к главе 7

1. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин: учебное пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 264 с.
2. Буяновский И.А. Граничная смазка // Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: Издательство ЛКИ, 2014. С. 226–278.
3. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.
4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
5. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
6. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.
7. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г.В. Буткевич [и др.]. М.: Энергия, 1978. 256 с.
8. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
9. Stolarski T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth – Heinemann, 1990. 300 p.
10. Rabinowicz E. The wear coefficient – magnitude, scatter, uses. // ASME Trans. Journal of Lubrication Technology. 1981. V. 103. Iss. 2. P. 188–193.
11. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: учебное пособие для машиностр. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
12. Основы теории электрических аппаратов. СПб.: Лань, 2015. 592 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	4
1.1. Роль трения в технике и повседневной жизни	4
1.2. Краткая историческая справка	6
1.3. Междисциплинарный характер трибологии	10
1.4. Основные термины и определения	13
Список литературы к главе 1	15
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ	16
2.1. Структура поверхностных слоев	16
2.2. Поверхностная энергия	18
2.3. Адгезия контактирующих поверхностей	21
2.4. Адсорбция на поверхности твердого тела	23
2.5. Механические свойства материала поверхностного слоя	27
2.6. Влияние механической обработки и трения на свойства поверхностного слоя	30
2.7. Эффект Ребиндера	32
2.8. Физические методы исследования поверхности и поверхностных слоев твердого тела	33
2.8.1. Оптическая микроскопия	34
2.8.2. Эллипсометрия	35
2.8.3. Методы исследования состава и структуры поверхности на атомарном уровне	36
2.8.3.1. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия	
2.8.3.2. Оже-электронная спектроскопия	36
2.8.3.3. Зондовые методы	37
2.8.3.3.1. Сканирующая туннельная микроскопия	38
2.8.3.3.2. Атомная силовая микроскопия	38
2.8.4. Другие методы	39
2.8.4.1. Просвечивающая и растровая электронная микроскопия	41
2.8.4.2. Дифракция медленных электронов	42
2.8.4.3. Дифракция рентгеновских лучей	43
2.8.4.4. Эмиссия электронов	43
2.8.4.5. Измерение работы выхода электронов	44
Список литературы к главе 2	46
ГЛАВА 3. МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ	48
3.1. Масштабные уровни рельефа поверхности	49

3.2. Основные термины и определения ГОСТ Р ИСО 4287-2014	51
3.3 Термины геометрических параметров	52
3.3.1. Параметры амплитуды профиля	53
3.3.2. Параметры расстояния (ширины) элементов профиля	55
3.3.3. Стандарт ISO 21920-2:2021	57
3.4. Опорная кривая	57
3.5. Характеристики формы неровностей	60
3.6. Вероятностно-статистические характеристики рельефа поверхности твердого тела	62
3.7. Параметры трехмерного рельефа поверхности	63
3.8. Методы оценки рельефа поверхности	66
3.8.1. Оптические методы	66
3.8.2. Щуповые (стилузные) методы	68
Список литературы к главе 3	70

ГЛАВА 4. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЛАДКИХ ТЕЛ ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

4.1. Упругий контакт	72
4.1.1. Упругий контакт гладких сферических тел	72
4.1.2. Упругий контакт гладких цилиндрических тел	74
4.2. Контакт жестко-идеально-пластических тел	75
4.2.1. Внедрение жесткого гладкого клина в пластическое полупространство	76
4.2.2. Смятие пластического клина жестким плоским штампом...	77
4.2.3. Пластический контакт осесимметричных тел	78
4.3. Переход от упругой деформации к пластической	78
4.4. Упругопластический контакт	80
Список литературы к главе 4	82

ГЛАВА 5. МЕХАНИКА И ФИЗИКА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

5.1. Три площади контакта технических поверхностей	83
5.2. Модель дискретного контакта технических поверхностей Крагельского – Демкина	85
5.2.1. Расчет характеристик пластического контакта	87
5.2.2. Расчет характеристик упругого контакта	89
5.3. Модель дискретного контакта технических поверхностей Гринвуда – Вильямсона	92
5.4. «Упругая твердость» дискретного контакта технических поверхностей	94
5.5. Критерии перехода от упругого контакта шероховатых поверхностей к пластическому	94

5.6. Пластический контакт при больших номинальных давлениях	95
5.7. Дискретный контакт с адгезией	97
5.8. Критерий степени влияния адгезионных сил на процесс контактирования поверхностей	103
Список литературы к главе 5	104
ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ	105
6.1. Виды трения в узлах машин	105
6.2. Трение покоя. Предварительное смещение	107
6.3. Трение скольжения	110
6.4. Зависимость коэффициента трения от нагрузки	114
6.5. Трение скольжения при больших номинальных давлениях	116
6.6. Физические теории трения скольжения	118
6.7. Особенности трения при граничной смазке [2, 16, 17]	122
6.8. Трение качения	126
6.9. Жидкостное трение	131
6.9.1. Природа жидкостного трения и его характеристики	131
6.9.2. Гидродинамическое и гидростатическое жидкостное трение	136
6.9.3. Эластогидродинамическая смазка	138
6.9.4. Газовая смазка	139
Список литературы к главе 6	139
ГЛАВА 7. ИЗНАШИВАНИЕ	141
7.1. Количественные характеристики изнашивания	142
7.2. Стадии изнашивания	144
7.3. Основные виды изнашивания	146
7.3.1. Абразивное изнашивание	147
7.3.2. Адгезионное изнашивание	150
7.3.3. Усталостное изнашивание	151
7.3.4. Фреттинг-изнашивание и фреттинг-коррозия	152
7.3.5. Эрозионное и кавитационное изнашивание	155
7.3.6. Окислительное и водородное изнашивание	155
7.3.7. Электроэрозионное изнашивание	156
7.4. Аналитические зависимости для прогнозирования износа	159
7.4.1. Уравнение Арчарда	159
7.4.2. Расчет усталостного износа по И.В. Крагельскому	164
7.4.3. Прогнозирование износа с помощью безразмерных критериев (факторов изнашивания)	165
7.4.4. Расчет электроэрозионного износа	167
Список литературы к главе 7	168

**Владимир Васильевич Измайлов
Марина Вячеславовна Новоселова**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ,
ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

Монография

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.А. Якушева

Подписано в печать 15.11.2023

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 10,75

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 9,998

Заказ № 1

Бумага писчая

Уч. изд. л. 9,353

С – 1

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22