

Лекция 1

История развития триботехники

Снижение износа является приоритетным направлением решения таких глобальных проблем как экономия энергии, сокращение расхода материалов, а также обеспечение надежности и безопасности механических систем.

Исходя из этого в последние годы стремительными темпами во всех развитых странах мира развивается триботехника, что в первую очередь связано с требованиями создания экономичных и долговечных машин, приборов и аппаратов, технологического оборудования и инструментов, а также с экологическими проблемами.

Триботехника – наука о контактном взаимодействии твёрдых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин.

Результатами внедрения достижений триботехники в практику являются:

- снижение потребления энергии за счет уменьшения трения;
- снижение затрат на смазочные материалы;
- снижение затрат на обслуживание и ремонт;
- исключение потерь, связанных с поломками оборудования;
- экономия вложений за счет более интенсивного использования оборудования, большого КПД, повышенной долговечности машин.

В последние годы в триботехнике получили развитие новые разделы – трибохимия, трибофизика и трибомеханика.

Трибохимия – изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Она исследует проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса и воздействие на поверхность деталей химически активных веществ.

Трибофизика – изучает физические аспекты взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении.

Трибомеханика – изучает механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении. Она рассматривает законы рассеяния энергии, импульсы, а также механическое подобие, релаксационные колебания при трении, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и др.

Первые попытки осмыслить природу трения были сделаны Аристотелем. Опираясь на наблюдаемые факты, он отмечал, что любое, в том числе равномерное, перемещение реальных тел в горизонтальной плоскости всегда встречает внешнее сопротивление, причем это сопротивление зависит от веса тела.

Значительный вклад в изучение причин трения внес Леонардо да Винчи. Обосновывая невозможность создания вечного двигателя, одной из

причин этого он считал трение. Леонардо да Винчи впервые ввел понятие коэффициента трения, показал, что сила трения зависит от материала соприкасающихся поверхностей, от качества их обработки, прямо пропорциональна нагрузке и может быть уменьшена путем установки роликов или введения смазки между поверхностями трения. Он является изобретателем роликового и шарикового подшипников.

Открытие Галилеем в конце XVI века закона инерции и понятия о массе тела позволило четко разграничить сопротивление движению, вызываемое инерцией и возникающее лишь при изменении скорости, от сопротивления внешней среды, которое имеется и при постоянной скорости и вызвано силами внешнего трения.

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

$$F = f \cdot N, \quad (1.1)$$

где f – коэффициент трения;

N – нормальная к плоскости трения нагрузка.

Высказанная Амонтоном идея, объясняющая природу трения, как подъем одного тела по неровностям другого разделялась многими крупными учеными вплоть до конца XVIII в.

Большую роль в дальнейшем развитии представлений о трении сыграл Л. Эйлер, первый убедительно объяснивший (в 1750 г.) причину того факта, что сопротивление при переходе от состояния покоя к относительному движению всегда больше, чем сопротивление скольжению при тех же условиях.

Создателем науки о трении по праву считается великий французский ученый Шарль Кулон. В своем труде "Теория простых машин" (1781 г.) он охватил основные аспекты трения: сопротивление скольжению, сопротивление качению и сопротивление страгиванию.

При исследовании трения скольжения различных металлов, минералов и сортов дерева Кулон обобщил закон Амонтона, показав, что часть силы трения не зависит или слабо зависит от нагрузки:

$$F = f \cdot N + A, \quad (1.2)$$

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

Кулон был первым, кто понял, что трение обусловлено множеством факторов (нагрузкой, скоростью скольжения, материалом трущихся деталей, шероховатостью их поверхностей и др.). Исследуя трение качения, Кулон впервые вывел формулу сопротивления перекачиванию:

$$F = \lambda \cdot N/r, \quad (1.3)$$

где λ - коэффициент трения качения, имеющий размерность длины;

N – вес свободно катящегося цилиндра радиусом r .

Эта классическая формула используется и сейчас, хотя предпринимались многочисленные попытки ее опровергнуть. Несмотря на фундаментальный вклад Кулона в теорию трения, он игнорировал энергетический и тепловой аспекты этого явления, без которых механизм трения понять невозможно.

Первым ученым, доказавшим, что механическая энергия при трении не исчезает, а превращается в тепло, был англичанин Бенжамин Томпсон (1798 г.). Наблюдая за сверлением пушечных стволов, он пришел к выводу, что сильный нагрев заготовок есть прямой результат перехода подводимой к сверлу механической энергии в тепловую вследствие интенсивного трения инструмента о металл.

Дальнейший вклад в энергетические аспекты теории трения был сделан Майером (1842 г.), Джоулем (1843 г.), Гельмгольцем (1847 г.). Тогда же (в середине XIX в.) были высказаны и первые предположения об адгезионной природе трения (адгезия – сцепление, слипание поверхностей прижатых друг к другу тел). Исследование роли адгезионных связей в трении получило дальнейшее развитие в различных физических теориях трения в 30-40-х годах XX в. (советские ученые В.Д. Кузнецов, Б.В. Дерягин, англичанин Д.А. Томлинсон и др.). В течение многих лет выдвигались и обосновывались различные гипотезы и модели трения. Однако оказалось, что познать в известном смысле сложную и сверхсложную систему (явление) — это значит разумно упростить ее, сохраняя все необходимые и достаточные факторы.

Таким выдающимся упрощением явилась модель дискретного контактирования твердых тел при трении и гипотеза о двойственной природе фрикционного контакта твердых тел. В 50-60-х годах XX в. И.В. Крагельским, Ф. Боуденом и Д. Тейбором на основе этой модели была создана современная молекулярно-механическая теория трения. На сегодняшний день важнейшим итогом развития этой теории является четкая картина процессов трения и износа твердых тел, охватывающая физические (включая механические) и химические сопутствующие явления.

Анализ предложенных модели и гипотезы позволил И.В. Крагельскому сформулировать и рассмотреть три последовательных и взаимосвязанных этапа процесса трения, а именно:

- взаимодействие поверхностей с учетом влияния среды взаимодействия;
- изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия;
- разрушение поверхностей вследствие двух предыдущих этапов.

Эта знаменитая триада И.В. Крагельского легла в основу многих последующих трибологических моделей при решении отдельных частных задач.

Согласно молекулярно-механической теории процесс трения представляется, как результат двух взаимосвязанных процессов: деформации контактирующих микронеровностей и молекулярного взаимодействия материалов на пятнах фактического контакта.

Высокие фактические давления на дискретных фактических контактах в сочетании со скоростью скольжения обуславливают значительные температуры в зонах касания, приводят к существенным изменениям с учетом влияния среды свойств поверхностных слоев, вызывают значительные механические и температурные напряжения в микро- и макрообъемах, способствуют протеканию химических процессов с образованием вторичных соединений и структур, активизируют взаимную диффузию. Такое взаимодействие поверхностей формирует так называемое «третье тело», что существенно меняет в первую очередь молекулярную (адгезионную) составляющую силы трения.

Силы молекулярного взаимодействия, развивающиеся в зоне фактического контакта, оказывают сопротивление взаимному перемещению поверхностей и тем самым влияют на силу трения. Согласно молекулярно-механической теории трения суммарный коэффициент трения равен

$$f = F/N = (F_m + F_d)/N = f_m + f_d, \quad (1.4)$$

где F – суммарная сила трения;

N – нормальная нагрузка;

F_m – молекулярная (адгезионная) составляющая силы трения;

F_d – механическая (деформационная) составляющая силы трения;

f_m – молекулярная (адгезионная) составляющая коэффициента трения;

f_d – механическая (деформационная) составляющая коэффициента трения.

Измененный тонкий поверхностный слой испытывает очень большие деформации, его свойства в сочетании с объемными свойствами определяют износостойкость и сдвиговые сопротивления.

Основные термины триботехники

Ряд терминов, относящихся к триботехнике, стандартизован. Стандарт включает 97 терминов, которые расклассифицированы по видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам. К общим понятиям триботехники относятся следующие термины.

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

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

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (длина, объём, масса и др.).

Скорость изнашивания - отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник. Различают мгновенную и среднюю скорости изнашивания.

Интенсивность изнашивания - отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объёму выполненной работы. Обычно применяется при выражении длительности работы двигателей в часах или пробегом автомобиля в тыс. км.

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

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

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

Смазывание – подведение смазочного материала к поверхности трения.

Прирабатываемость материала деталей - свойство материала уменьшать силы трения, температуру поверхностей и интенсивность изнашивания в процессе приработки.

Схватывание при трении - явление местного соединения двух твёрдых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

Заедание поверхностей - процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала.

Задиры поверхностей - повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

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

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

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

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

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

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

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

Поверхность трения – поверхность тела, участвующая в трении.

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

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

Убытки от трения и износа в машинах

Большинство машин (85...90%) выходит из строя по причине износа деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в 6 раз, для самолетов до 5 раз, для станков до 8 раз.

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

Особенно велик износ деталей и рабочих органов машин-орудий, которые эксплуатируются в абразивной и агрессивной средах, и деталей транспортных машин, работающих в условиях грязи и пыли.

Например, ресурс дробящих плит составляет в среднем 4...6 месяцев, зубьев ковшей экскаваторов, скреперов и бульдозеров, шнеков - 6...8 месяцев. Контрольные сроки службы до капитального ремонта угольных комбайнов 8...12 месяцев, а конвейеров в угольных шахтах - 2...3 года.

Дизели, установленные на мощных автосамосвалах, требуют капитального ремонта после 1500...2000 часов работы, т.е. через 6...8 месяцев. Бортовые шестерни тракторов работают до замены не более 2000...2500 ч., срок службы транспортных трансмиссий до ремонта составляет 2500...3500ч. За сезон работы тракторов на песчаных почвах приходится заменять два-три комплекта гусениц, что в среднем обходится в 50% стоимости нового трактора.

Большие материальные потери народное хозяйство терпит от повышенного трения в узлах машин. Известно, что более половины топлива, потребляемого автомобилями, тепловозами и другими видами транспорта, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в подвижных сочленениях.

В текстильном производстве на преодоление сопротивления трению затрачивается около 80 % потребляемой энергии. Низкие КПД многих машин обусловлены главным образом большими потерями на трение.

Лекция 2

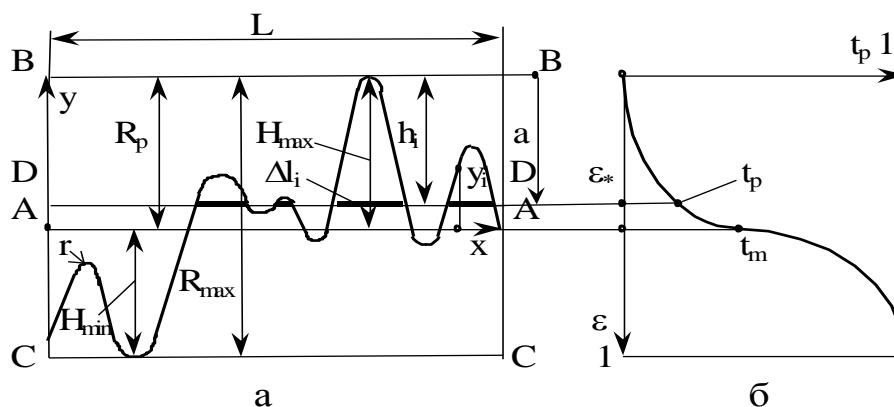
Общие сведения о поверхности детали и ее геометрии

Всякое тело имеет отклонения от идеальной геометрической формы. Погрешности обработанной поверхности бывают трех видов:

- макрогеометрические отклонения;
- волнистость поверхности;
- шероховатость поверхности.

Основные характеристики микрогеометрии в соответствии с ГОСТ 2789-73.

Установленные этим стандартом характеристики шероховатостей иллюстрирует рис. 2.1. Основные из них: R_a , R_z и R_{max} и шаг микронеровностей.



Р и с. 2.1. Характеристики шероховатостей
а) - характеристики шероховатостей; б) - опорная кривая.

Наиболее часто в технике применяют характеристику R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей от средней линии в пределах базовой длины L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (2.1.)$$

В формуле (1.1.) L - базовая длина, в пределах которой находится достаточно представительное число микронеровностей с точки зрения статистики; U_i - расстояние точки профиля от средней линии (см. рис. 2.1, а), n - число точек профиля, в которых измерено U_i . Положение средней линии AA находится из соображения о том, что она делит площадь профиля пополам ($\int_0^L y dx = 0$). Профиль заключен между линиями выступов BB и впадин CC , которые проводятся через вершины самых высоких выступов и самые низкие точки впадин.

Параметр R_z - характеризует среднее расстояние между пятью высшими вершинами выступов и пятью низшими точками впадин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |H_{i\max}| + \sum_1^5 |H_{i\min}| \right). \quad (2.2)$$

Расстояние между линиями выступов и впадин (R_{\max}) равно толщине шероховатого слоя. Удаление линии выступов от средней линии обозначается R_p . Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа.

По своей форме выступы напоминают пологие горные хребты. Угол при вершине для всех видов обработки обычно заключен в интервале от 150° до 176° . Наиболее близким по форме к реальному выступу является эллипсоид.

Обычно шероховатость имеет направленный характер, отражающий траекторию движения обрабатывающего инструмента. В связи с этим профилограммы снимают в продольном и поперечном направлениях. Средний радиус вершины выступа находят как среднегеометрическое из значений, измеренных в продольной и поперечной профилограммах:

$$r_{\text{ср.}} = \sqrt{r_{\text{ср. прод.}} \cdot r_{\text{ср. попер.}}} \quad (2.3)$$

Для статистического анализа и представления характеристик шероховатых поверхностей используют закон распределения материала по глубине шероховатого слоя на выбранной базовой длине L , который характеризует опорная кривая (см. рис. 2.1, б). Эту кривую получают как зависимость относительной суммы сечений микровыступов $t_p = \frac{1}{L} \sum_1^m \Delta L_i$ от

относительного сближения $\varepsilon_* = \frac{a}{R_{\max}}$.

Для аналитического описания опорной кривой используют степенную функцию. Так, начальный участок опорной кривой (см. рис. 2.1, б) принято описывать выражением

$$t_p = t_m \varepsilon^v. \quad (2.4)$$

Здесь $\varepsilon = a/R_p$, $t_m=t_p$ при $a=R_p$, $v>1$ - параметры опорной кривой . Число выступов по мере удаления от верхней границы шероховатого слоя меняется по закону:

$$n = n_0 \left(\frac{a}{R_p} \right)^{v-1}, \quad (2.5)$$

где n_0 - число выступов, вершины которых лежат выше средней линии.

Стандартом предусмотрено 14 классов шероховатости. В табл. 2.1. для примера приведены данные шероховатости наиболее ответственных деталей ДВС автомобилей.

Таблица 1.1

Характеристики шероховатости

Наименование детали	Класс	R_a , мкм	r , мкм	R_{max} , мкм
Гильза цилиндра	9	0,04	100	1,2
Коленвал (шейки)	9	0,05	500	1,6
Поршневое кольцо	10÷11	0,02	270	0,48

Используя рассмотренные здесь стандартные характеристики, решают задачу оценки фактической площади контакта шероховатых поверхностей (ФПК).

На рис. 2.2 показана структурная схема площади контакта. Площадки фактического контакта ΔA_{fi} сгруппированы на площадях касания волн, совокупность которых составляет контурную площадку контакта ΔA_{ci} (КПК). Общая площадь соприкосновения тел (кажущаяся), в пределах которой заключены ФПК и КПК, называется номинальной площадью контакта A_a (НПК).

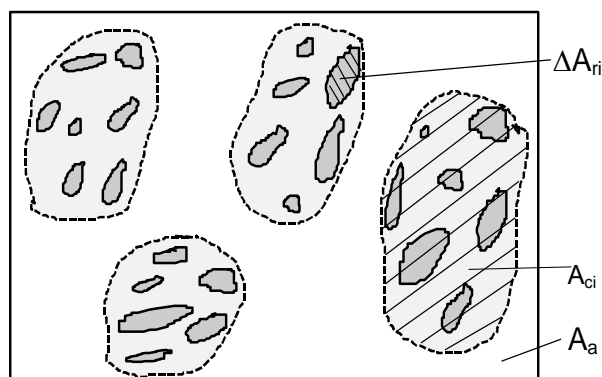


Рис. 2.2. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей:

- A_a - номинальная площадь контакта;
- A_{ci} -контурная площадка;
- ΔA_{fi} - фактическая площадь единичного пятна контакта.

Суммарная площадь фактического контакта

$$A_r = \sum_1^n \Delta A_{ri}.$$

Наиболее полно методика расчета ФПК разработана профессором Н.Б. Демкиным (Тверской технической университет). В целях расчета ФПК шероховатость поверхности обычно моделируют набором сферических сегментов, вершины которых разбросаны по высоте таким образом, чтобы сохранить закон распределения материала в шероховатом слое, который задается с помощью полученной из опыта опорной кривой.

Остаточные напряжения, структурные и фазовые превращения

Остаточными называют напряжения, существующие в теле при отсутствии внешних силовых нагрузок на него. Наличие этих напряжений обусловлено неравномерностью температуры по объему тела, образованием во время нагрева или охлаждения новых структур с иной плотностью, наличием включений и др. Остаточные напряжения образуют равновесную структуру. В зависимости от объема, который охватывается этой системой, различают собственные напряжения трех родов. Напряжения первого рода уравниваются в крупных объемах; соизмеримых с размерами детали; напряжения второго рода (микронапряжения) уравниваются в пределах одного или нескольких кристаллических зерен; напряжения третьего рода - субмикроскопические искажения кристаллической решетки. Напряжения второго и третьего родов не имеют ориентировки относительно осей детали.

Пластическая деформация вызывает уменьшение плотности металла или, что то же самое, увеличение его удельного объема. Пластически деформированный при резании слой не может свободно увеличиваться в объеме (этому препятствуют недеформированные металлические изделия), поэтому в наружном слое появляются напряжения сжатия, а в остальной части - напряжения растяжения. Это рассуждение предполагает, что деформируемый слой не находится даже частично в состоянии ползучести. В зависимости от температуры металл может быть в упругом и пластичном состояниях. В состоянии ползучести металла силы упругости не проявляются, и деформация протекает без стремления материала к восстановлению формы. За температуру t_p перехода из упругого состояния металла в пластическое можно принять 450°C для углеродистых сталей и 550°C для легированных. Средняя температура поверхностного слоя стали при шлифовании составляет самой поверхности $800..850^{\circ}\text{C}$. Температуры того же порядка развиваются при скоростном тчении. Нагрев поверхностного слоя металла при обработке обуславливает образование в нем температурных напряжений (рис. 2.3).

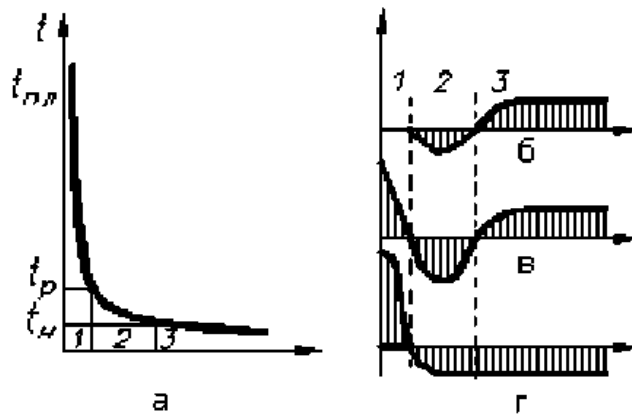


Рисунок 2.3 - Схема образования остаточных температурных напряжений в поверхностном слое: а - температура изделия при обработке; б - распределение напряжений в теле изделия при обработке; в - напряжения после остывания наружного слоя до температуры t_p ; г - остаточные температурные напряжения

Допустим, что в процессе обработки цилиндрической детали слой 1 находится в состоянии ползучести. В этом слое внутренние напряжения отсутствуют, а если до того существовали остаточные напряжения, то они снимаются. В слое 2 с температурой ниже t_p , но выше нормальной $t_{нн}$, возникают напряжения сжатия, а в слое 3 - растяжения. Напряжения эти временные. Как только наружный слой охладится до температуры t_p , он станет упругим. Встречая сопротивление сокращению, он оказывается растянутым в окружном направлении. В слое 2 сжимающие напряжения возрастают. При дальнейшем охлаждении до полного выравнивания температуры по глубине металла напряжения растяжения в слое 1 возрастают, а в слоях 2 и 3 устанавливается система уравновешивающих напряжений сжатия. По характеру остаточные температурные напряжения, равно, как и обусловленные пластической деформацией, являются напряжениями первого рода. Однако из-за неодинакового тепловыделения на смежных участках обрабатываемой поверхности и различной степени пластической деформации возникают также остаточные напряжения второго рода.

Местные фазовые и структурные превращения поверхностного слоя шлифуемой детали известны под названием шлифовочных прижогов. Они образуются вследствие интенсивного (почти мгновенного) тепловыделения на небольшом участке поверхностного слоя.

При резании металлов протекают два противодействующих друг другу процесса: упрочнение в результате действия сил резания, которые тем выше, чем больше давление резания, и разупрочнение - снятие наклепа за

счет повышающейся температуры резания. Степень наклепа и толщина наклепанного слоя при прочих равных условиях зависят от режима резания.

Показатели качества поверхности

Качество поверхности деталей характеризуется микро- и макрогеометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Глубина поверхностного слоя и качество поверхности зависят от основного материала, вида обработки, основных параметров инструмента, режима обработки и рода смазочно-охлаждающей жидкости.

Поверхностный слой неоднороден по строению (рис 2.4)

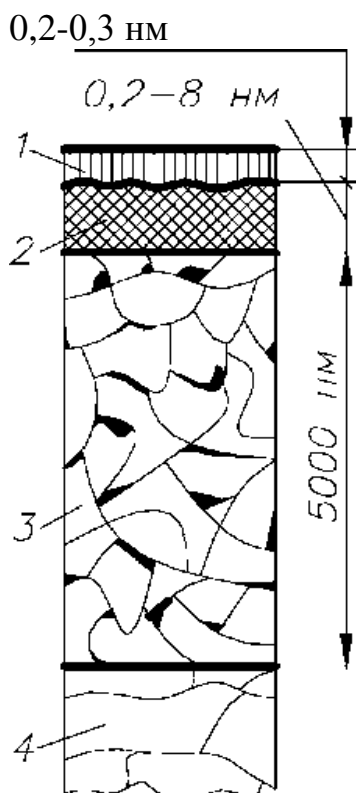


Рисунок 2.4 - Структура поверхностного слоя шлифованной детали из углеродистой стали

Граничный слой 1 состоит из адсорбированной пленки газов, влаги и смазочно-охлаждающей жидкости, которую можно удалить лишь нагревом детали в вакууме. Слой 2 - деформированный, сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглероженными под действием высоких температур при шлифовании участками; в нем находятся окислы и нитриды, пустоты, надрывы и трещины. Слой 3 состоит из зерен, сильно деформированных под действием давления (шлифовального круга) и тангенциальных сил при шлифовании; в нем

содержится структурно-свободный цементит, образовавшийся под действием высоких температур. Слой 4 - металл с исходной структурой. При более тонкой обработке (абразивными брусками, лентами и т.д.) слой 1 не изменяется по толщине, а слои 2 и 3 уменьшаются в соответствии с меньшими давлением и температурой поверхности при обработке.

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

Следует иметь в виду, что шлифовочные прижоги могут достигать глубины 5 мм. Поверхностный слой может находиться в напряженном состоянии. Остаточные напряжения в нем при механической обработке могут достигать 560...1000 МПа и быть как сжимающими, так и растягивающими.

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

Лекция 3

Физико-химические свойства поверхностей деталей

Поверхностная энергия

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

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри твердого тела. Избыток энергии, отнесенной к единице поверхности, называют удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией. Полная энергия кристалла состоит из внутренней и поверхностной энергии. Последняя

пропорциональна поверхности раздела фаз, поэтому особенно возрастает при диспергировании твердых тел. Она во многом определяет свойства высокодисперсных систем - коллоидов.

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

Адсорбция и хемосорбция

В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул газа, движущихся к твердой поверхности, или взаимодействия жидкости, соприкасающейся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твердого тела. Явления образования на поверхности твердого тела тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ, либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют адсорбцией.

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

Так, имеются основания считать, что адсорбция жирных кислот на металлических поверхностях при нормальной температуре носит в основном физический характер, а при повышенной температуре - химический.

Жидкости с молекулами большой длины, содержащие в растворе поверхностно-активные вещества, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, в котором молекулы расположены не беспорядочно, как в объеме жидкости, а правильно ориентированы. Граничные слои находятся в особом агрегатном состоянии, имея квазикристаллическую структуру, что дает основание говорить об особой фазе жидкости - граничной фазе.

Адсорбционный эффект понижения прочности (эффект Ребиндера)

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно активные вещества, молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности тела, с которым взаимодействуют (органические кислоты, спирты, смолы, дистиллированная вода). Эти молекулы полярные. Например, если поместить металлическое тело рядом

с летучим веществом, (например, валерьяновой кислотой), то молекулы кислоты, испаряясь и перемещаясь через воздух, покроют поверхность тела слоем в 1 молекулу, причем, если намочить поверхность, то получается многомолекулярный слой строго ориентированных молекул поверхностно активного вещества (рис.3.1).

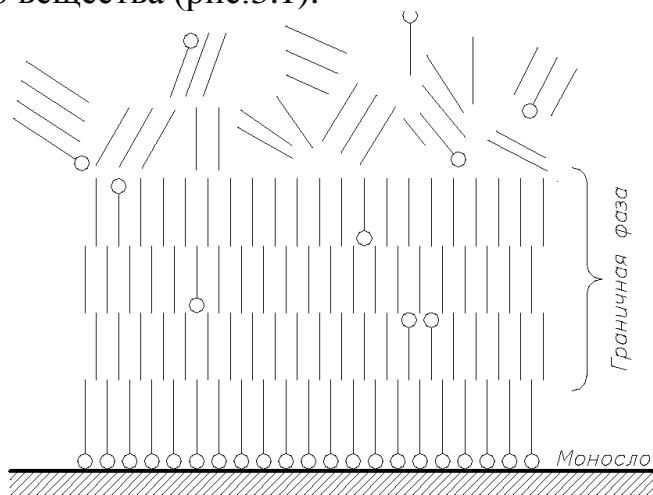


Рисунок 3.1 – Схема адсорбированного монослоя полярных молекул и ориентация неполярных молекул

П.А. Ребиндером установлено, что поверхностно активная среда значительно снижает сопротивление деформированию (в холодном состоянии) и разрушению твердых тел в результате физической адсорбции поверхностно активных веществ. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 3.2. Эффект Ребиндера является внешним эффектом: снижается поверхностная энергия твердого тела - облегчается выход дислокаций (неоднородностей кристаллического строения вещества).

Молекулы поверхности активной среды проникают в трещины и "раздвигают их" (рис. 3.3).

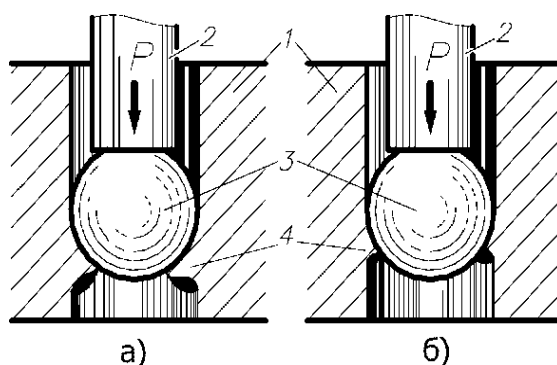


Рисунок 3.2 – Схема продавливания шарика без смазочного материала (а) и с окисленным парафином (б) (по данным П.П. Ребиндера): 1 - образец; 2 - пуансон; 3 - шарик; 4 - наплыв металла.

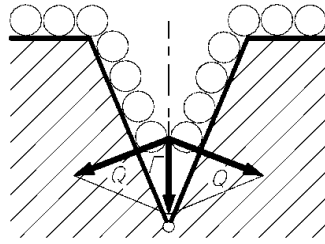


Рисунок 3.3 – Схема адсорбционно-расклинивающего действия молекул смазочного материала

Расплавленные легкоплавкие металлы являются сильными поверхностно активными веществами по отношению к более тугоплавким и резко снижают их прочность.

Лекция 4-5

Контакт и трение в узлах деталей машин

По молекулярно-механической теории трения природа трения двойственна – трение обусловлено преодолением адгезионных связей между трущимися поверхностями и деформированием тонких поверхностных слоев твердых тел.

В основе этой теории лежат следующие представления. Из-за волнистости и шероховатости поверхностей соприкосновение твердых тел происходит лишь в отдельных пятнах контакта, сосредоточенных на вершинах волн (см. лекцию 2). Диаметр эквивалентных круглых пятен касания фрикционных связей составляет от 1 до 50 мкм в зависимости от природы поверхности, вида обработки, режима трения. Общая площадь фактического действительного контакта для реальных деталей мала и составляет от 0,01 до 0,0001 видимой площади трения.

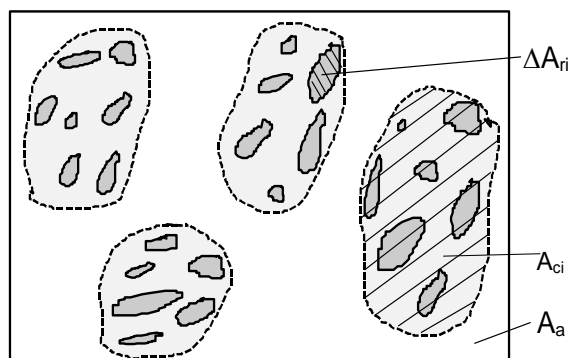


Рисунок – 4.1. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей:

A_a - номинальная площадь контакта;

A_{ci} - контурная площадь;

ΔA_{ri} - фактическая площадь единичного пятна контакта.

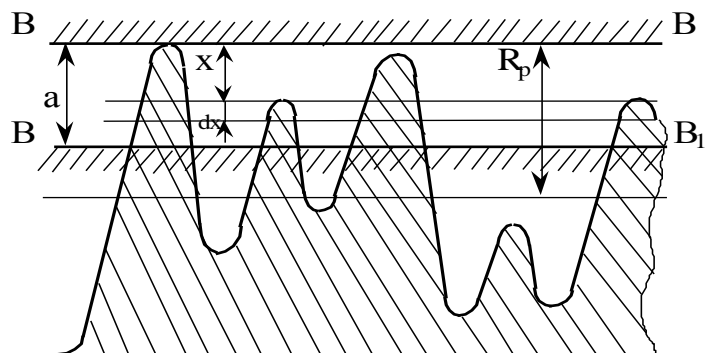


Рисунок – 4.2. К анализу оценки фактической площади контакта

На пятнах действительного контакта образуются адгезионные мостики – мостики сварки между твердыми телами, являющиеся результатом различного рода молекулярных взаимодействий. Возникновение этих связей неминуемо, так как поверхностная энергия системы согласно второму закону термодинамики стремится к минимуму, а на границе твердое тело – воздух она значительно больше.

Помимо адгезионного взаимодействия в зонах фактического контакта более жесткие выступы внедряются в сопряженное тело. Внедрение одной поверхности в другую при действии только сжимающей нагрузки может быть и в том случае, когда поверхности трения практически не имеют шероховатостей (полированы). Это происходит вследствие того, что металлы и сплавы обладают анизотропией механических свойств. Различно ориентированные кристаллиты по-разному сопротивляются сжатию, и первоначально гладкие поверхности при сжатии становятся шероховатыми. Соприкосновение тел происходит в отдельных точках и сопровождается внедрением одного тела в другое.

При рассмотрении под микроскопом поверхностей трущихся деталей можно наблюдать, что по мере приработки на поверхностях в направлении движения образуются тончайшие канавки (желобки); их глубина составляет доли микрометра. Материал раздвигается в стороны и поднимается твердыми неровностями. Образующиеся мостики сварки между неровностями разрушаются срезаются и формируются вновь. Таким образом, из молекулярно-механической теории трения следует, что процесс внешнего трения представляет собой деформирование весьма тонких поверхностных слоев каждого из соприкасающихся тел осложненное разрушением адгезионных мостиков между пленками покрывающими эти тела. Трение значительно меняет рельеф соприкасающихся поверхностей.

В процессе деформирования на участках фактического контакта повышается температура (температурные вспышки). Величина этих вспышек зависит от продолжительности существования фрикционной

связи на пятне контакта, шероховатости, прямо пропорциональна скорости скольжения и составляет величину порядка микросекунд.

Согласно молекулярно-механической теории трения износ происходит следующим образом. Различные пятна контакта при трении деталей взаимодействуют по-разному. На одних пятнах происходит упругий контакт, на других – пластический, а на третьих может быть микрорезание.

Современная теория износа предусматривает пять видов фрикционных связей (рисунок 4.3).

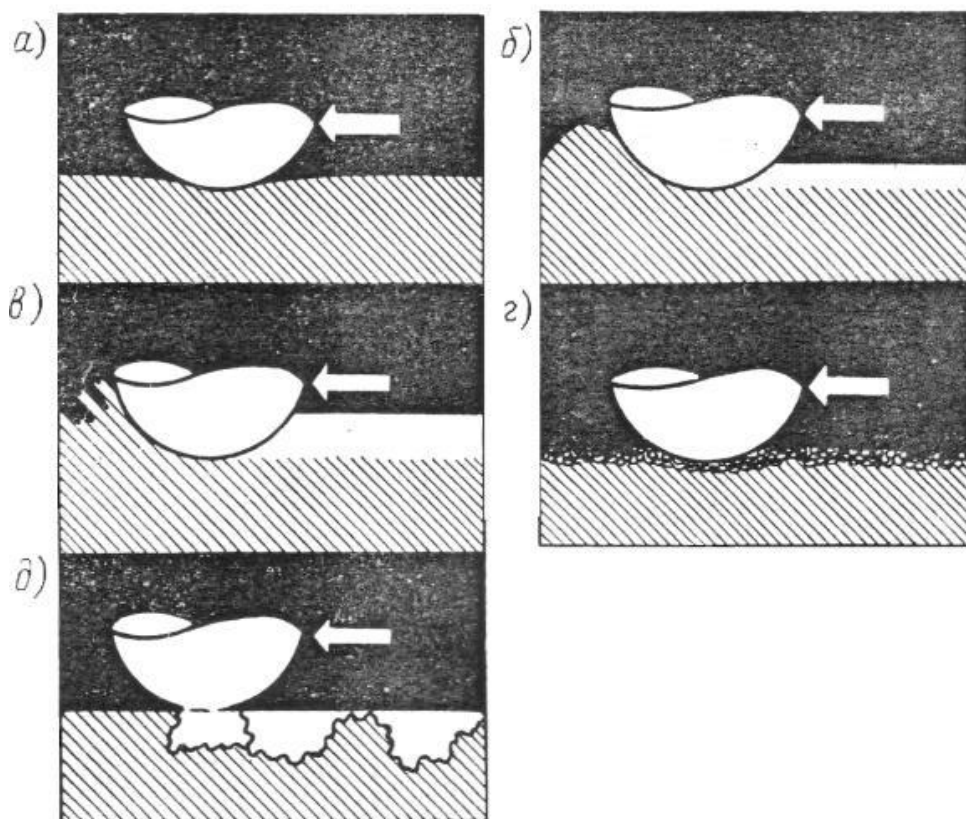


Рисунок 4.3 – Классификация фрикционных связей
а–упругое деформирование; б–пластическое деформирование;
в–упруго-пластическое деформирование; г–прочность адгезионной связи меньше прочности основного материала; д– прочность основного материала меньше прочности адгезионной связи

Первые три вида различаются характером деформирования материалов, последние – соотношением между прочностью адгезионной связи и основного материала. При упругом контакте для того чтобы материал был разрушен, необходимо большое количество воздействий ($10^5 \dots 10^8$), а при микрорезании и глубинном вырывании разрушение поверхности происходит при единичном взаимодействии.

Анализ видов нарушения фрикционных связей позволяет наметить пути повышения износостойкости узлов трения машин. Наибольшую

износостойкость обеспечивают режимы трения, соответствующие нарушению фрикционных связей по схеме на рисунках 4.3-а и 4.3-г, т.е. при сочетании упругого контактирования трущихся поверхностей с разрушением адгезионных связей в тонком поверхностном слое.

При большом взаимном проникновении шероховатостей поверхностей может случиться, что внедрившиеся выступы одной детали будут нагребать впереди себя материал сопряженной детали. В этом случае внешнего трения уже не будет, а будет трение внутреннее. Деталь работает как напильник по мягкому материалу. При рассмотрении задачи пластичности по внедрению жесткого сферического индентора в пластически деформируемое пространство получена формула, которая определяет предельную глубину относительного внедрения h/R , соответствующую переходу от внешнего трения к внутреннему.

Виды трения

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

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

Трение без смазочного материала

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

Трение имеет молекулярно-механическую природу. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала и т.п.) вызывают на участках контакта адгезию. Она возможна между металлами и пленками окислов. Адгезия может быть обусловлена одновременно и действием электростатических сил. Силы адгезии, как и молекулярные силы, прямо пропорциональны площади фактического контакта. Приложенное давление влияет на эти силы косвенно, через площадь фактического контакта.

Молекулярные силы как силы, перпендикулярные поверхности, казалось бы, не должны производить работу при относительном тангенциальном перемещении поверхностей. То же должно относиться и к силам адгезии, если образовавшаяся вследствие адгезии связь между телами разрушается по месту соединения. На самом же деле относительное смещение поверхностей при наличии взаимного притяжения и адгезии сопровождается деформацией сдвига, что вследствие неидеальной упругости материала требует дополнительных затрат энергии. Разумеется, большую тангенциальную силу надо приложить, если связь между телами нарушается не по месту соединения, а на некоторой глубине от поверхности контакта. Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщению.

Статическая сила трения в зависимости от продолжительности неподвижного контакта возрастает до некоторого предела. Сила трения движения зависит от скорости скольжения, причем соответственно давлению и параметрам поверхности трущихся тел коэффициент трения может монотонно изменяться и иметь максимум или минимум.

Трение без смазочного материала сопровождается скачкообразным скольжением поверхностей, с чем связаны, например, вибрация автомобиля при включении сцепления, «дергание» при торможении, «визг» тормозов, вибрация резцов при резании и нарушение плавности работы медленно движущихся деталей. Можно рекомендовать следующие меры борьбы со «скачками» при трении: увеличение жесткости системы; повышение скорости скольжения; подбор пар трения, для которых коэффициент трения незначительно возрастает с ростом продолжительности неподвижного контакта и при повышении скорости не имеет минимума. Окисные пленки поверхностей трения при соответствующем составе уменьшают силу трения и интенсивно изнашиваются. Состав и свойства этих пленок (равномерность покрытий, прочность связи с основанием, интенсивность их образования) зависят в значительной степени от химического состава материала деталей, а также параметров качества трущихся поверхностей.

Трение при граничной смазке

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

Все масла способны адсорбироваться на металлической поверхности. Прочность пленки зависит от наличия в ней активных молекул, качества и количества последних.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности, что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде ворса (рисунок 4.4.). При взаимном перемещении поверхностей трения «ворсинки» как бы изгибаются в противоположные стороны. На самом же деле происходит сдвиг с перекосом квазикристаллической структуры пленки. Сопротивление ее скольжению в таком состоянии несколько повышено.

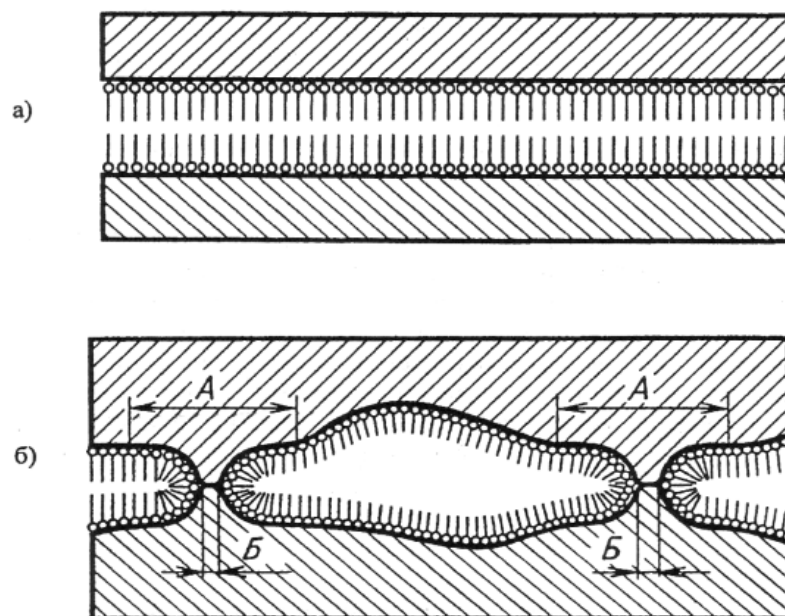


Рисунок 4.4 – Схемы скольжения тел в условиях граничной смазки: а – смазывание идеальных поверхностей; б – контактирование реальных поверхностей; А – участки, воспринимающие нагрузку; Б – участки непосредственно контакта или контакта при твердых пленках

Смазочный материал в граничном слое анизотропен, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и при толщине слоя больше некоторой критической величины скользят друг по другу; по нормали к твердой поверхности пленка обладает высоким сопротивлением сжатию; ее несущая способность исчисляется десятками тысяч килограммов на 1 см^2 . Величина деформации сжатия пленки в довольно широком интервале не выходит за пределы упругости.

Механизм трения в условиях граничной смазки представляется в следующем виде. Под нагрузкой происходят упругая и пластическая деформации на площадках контакта, под которыми здесь следует понимать площадки наиболее близкого прилегания поверхностей, покрытых граничной пленкой смазочного материала, вплоть до мономолекулярного слоя. На площадках контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки. Сопротивление движению при скольжении складывается из сопротивления

сдвигу граничного слоя и сопротивления «пропахиванию» поверхностей внедрившимися объемами. Кроме того, на площадках контакта, подвергнутых наиболее значительной пластической деформации, и в местах с высокими местными температурами может произойти разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии обнажившихся поверхностей и даже схватывание металлов на микроучастках Б (см. рисунок 4.4). Это вызывает дополнительное сопротивление движению.

Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что сообщает смазочной пленке свойство «самозалечивания» при местных ее повреждениях. Это свойство играет большую роль в предупреждении лавинного процесса схватывания.

Невозобновляемая граничная пленка по мере возрастания пути трения изнашивается, масло из пленки адсорбируется на продуктах изнашивания и уносится с поверхности трения; происходит сублимация пленки и удаление масла в атмосферу.

Окисление пленки способствует дезориентации структуры и ее разрушению.

Вязкость масла не влияет на процесс граничной смазки. Масла с одинаковой вязкостью, но разных марок, имеют различное смазывающее действие.

Добавление в граничные слои смазочного материала и водных растворов поверхностно-активных веществ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа (до 2 раз).

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

В связи с невысокой термической стойкостью граничной пленки, образуемой на металлических поверхностях обычными минеральными смазочными маслами, иногда прибегают к искусственному повышению ее химической активности. Этого достигают путем введения в масла специальных добавок (присадок), содержащих органические соединения серы, фосфора, хлора или этих элементов в разных сочетаниях. Вводят также мышьяк и сурьму. Хотя эти присадки прочно адсорбируются на поверхностях трения, однако им отводится в процессе трения другая роль. В условиях высоких температур на микроконтактах активная часть присадок разлагается и, взаимодействуя с металлическими поверхностями, образует пленки сульфида железа, фосфита или фосфата железа,

хлористого железа и окисленных хлоридов и т.п. Образовавшиеся пленки предотвращают металлический контакт, понижают сопротивление трению, препятствуют дальнейшему локальному повышению температуры. Пленка оказывает слабое сопротивление срезу, срывается и восстанавливается вновь.

Пленка, образуемая на поверхности стали хлорированными углеводородами, работоспособна до температуры 40⁰С. Выше этой температуры происходит плавление и (или) разложение. У сульфидов температура плавления выше, и смазывающая способность сохраняется до температуры 80⁰С. Ниже критической температуры пленка ведет себя как твердый смазочный материал.

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

По мере работы узла трения присадки к маслу срабатываются и их эффективность действия снижается.

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

Трение при жидкостной смазке (Гидродинамическое трение)

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

Явление трения при жидкостной смазке было открыто в 1883 г. Н.П. Петровым, создавшим основы гидродинамической теории смазки. Современная гидродинамическая теория смазки позволяет определить несущую способность масляного слоя и его минимальную толщину. Существуют два способа создания давления в несущем слое. При первом способе специально предусмотренный насос создает гидростатическое

давление, достаточное для разделения поверхностей трения. Утечка масла через торцы подшипника компенсируется соответствующей подачей насоса. При втором способе давление в смазочном слое развивается автоматически. Для этого необходимы надлежащие конструктивные мероприятия и подбор марки масла в зависимости от скорости скольжения.

Минимальная толщина слоя должна быть больше, чем суммарная высота наиболее высоких микронеровностей обеих поверхностей: $h_{\min} \geq (R_{\max 1} + R_{\max 2})$ (см. рис.2.1). Масло является вязкой жидкостью. Сила внутреннего трения выражается формулой Ньютона:

$$F = \eta \frac{dV}{dz} S, \quad (4.1)$$

где η - динамическая вязкость;
 dV/dz - поперечный градиент скорости;
 S - площадь сдвига слоев смазки.

Если скорость в направлении, перпендикулярном течению, по мере заглубления меняется по линейному закону (см. рис. 4.5), то $dV/dz = V/h$.

В таком случае формулу (1.57) можно записать в виде

$$F = \eta VS/h. \quad (4.2)$$

Вязкость масла зависит от температуры и давления. С ростом температуры наблюдается резкое снижение вязкости. Повышение давления приводит к слабому увеличению вязкости.

Вязкопластическая смазка.

Пластичные смазочные материалы, как и жидкие, могут обеспечить режим трения, исключая непосредственный контакт поверхностей и их взаимное внедрение. В отличие от масел, являющихся вязкими жидкостями, пластичные смазочные материалы обладают вязкопластическими свойствами. Поток такого материала имеет следующие особенности. В нем имеются зоны, в которых отсутствует послойное скольжение, течение в них происходит как в идеальной

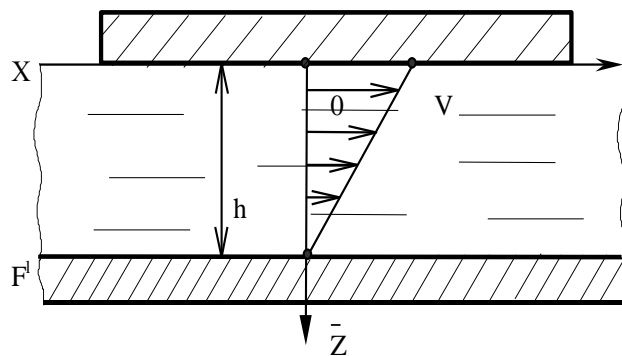


Рисунок – 4.5. Линейный закон распределения скоростей в потоке

пластичной среде; вне этих зон течение вязкое. Возможно также скольжение смазочного материала относительно стенок подшипника.

Контактно-гидродинамическая смазка. При качении или при качении со скольжением масло втягивается в зону контакта движущимися поверхностями. При некоторых условиях, аналогичных условиям возникновения гидродинамической смазки между скользящими поверхностями, в масляном слое образуется подъемная сила.

Трение при полужидкостной смазке

Такое трение имеет место при наличии одновременно жидкостной и граничной смазки.

Нормальная нагрузка в случае трения при полужидкостной смазке уравнивается нормальной составляющей сил взаимодействия поверхностей на площадках их контакта и силами гидродинамического давления в смазочном слое. Относительная доля каждой реакции зависит от нагрузки, скорости взаимного перемещения поверхностей, их шероховатости, жесткости и макрогеометрии, количества и вязкости смазочного материала. Сила трения складывается из касательной составляющей сил взаимодействия поверхностей и сопротивления вязкому сдвигу.

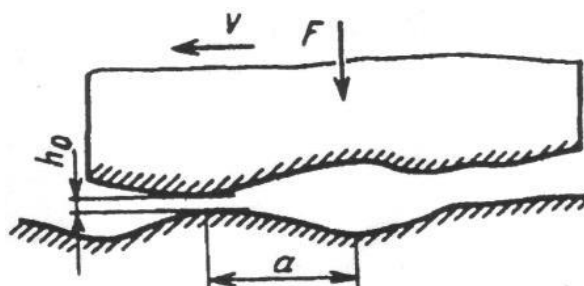


Рисунок 4.6 – Схема элементарного гидродинамического клина, образованного неровностями поверхностей трения (a – длина элементарного масляного клина; h_0 – начальный зазор между поверхностями в вершине элементарного клина).

Гидродинамическое действие жидкости может возникнуть в двух случаях:

1) если макрогеометрия соприкасающихся поверхностей такова, что существует сужающийся зазор, в который масло может попасть при трении, то при подаче масла в достаточном количестве и при подходящих параметрах режима трения возникнет поток и образуется подъемная сила. Однако эта сила недостаточна для полного восприятия нагрузки при полужидкостной смазке; поток жидкости обтекает участки взаимного контакта поверхностей;

2) если неровности между площадками контакта образуют в направлении относительного перемещения деталей места сужения и расширения по высоте. При достаточном количестве масла между поверхностями трения при заполнении микрополостей сужения они играют роль гидродинамических микроклиньев (рисунок 4.6.). Гидродинамическое действие масла на микроклиньях проявляется уже при самой малой скорости скольжения.

Преимущество смазочных масел перед твердыми смазочными материалами заключается в том, что они могут не только создавать гидродинамический эффект при соответствующих условиях, но и служить для охлаждения узла трения.

Трение качения

Сила трения качения на порядок и более меньше силы трения скольжения. Сопротивление качению объясняется деформационными потерями в нижележащем твердом теле. При отсутствии пластической деформации трение обусловлено гистерезисными потерями в твердом теле. При трении качения происходит взаимное проскальзывание поверхностей, которое можно представить при рассмотрении качения шарика (рисунок 4.7.). Окружность АВ шарика перемещается посередине канавки, а окружность CD касается ее края. Окружность АВ проходит за один оборот шарика большее расстояние, чем окружность CD. Эта разница и обуславливает скольжение поверхностей трения.

Гистерезисные потери при трении качения поясним с помощью рисунка 4.7.

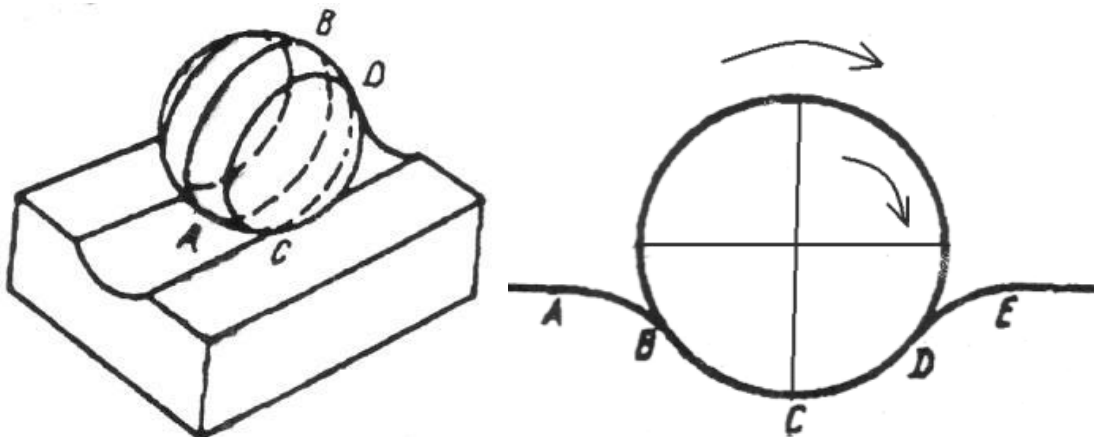


Рисунок – 4.7 Схема трения качения

Еще О. Рейнольдс заметил, что когда цилиндр из твердого материала катится по плоской поверхности резины, то при каждом обороте он проходит путь меньший, чем длина окружности цилиндра. Он предположил, что резина растягивается в точке С не так, как в точках В и

D, и в результате имеет место, как уже упоминалось, проскальзывание с соответствующим рассеиванием энергии. Из рисунка 4.7 видно, что впереди под шариком в точке E образуется углубление, а позади шарика в точке A деформируемый материал полностью (резина) или частично (металл) восстанавливается под действием сил упругости либо упругого гистерезиса; кроме того, вследствие необратимой пластической деформации силы реакции позади шарика меньше, чем силы давления впереди него. В результате шарик совершает работу деформации.

При трении качения в случае твердых тел деформации поверхностей невелики, и окисные пленки, имеющиеся на поверхности трения, не подвергаются значительным разрушениям. Скольжение поверхностей поэтому происходит не по металлу, а по окисным пленкам, которые могут изнашиваться.

Для приработанного состояния поверхностей по экспериментальным данным сила трения качения

$$F_{\text{кач}} = \frac{k \cdot N^n}{D^m} = \frac{F_o \cdot R}{N} \cdot \frac{N^n}{D^m}, \quad (4.3)$$

где k – константа, зависящая от материала;

N – нагрузка на шарик;

D – диаметр шарика;

n, m – показатели степени – $n = 1,7 \dots 1,85$; $m = 1,5 \dots 1,6$.

Сила трения в подшипниках качения при высоких скоростях зависит от вязкости смазочного материала и может достигать больших величин. На силу трения в подшипниках качения влияют вязкость смазочного материала, трение в сепараторе подшипника, размер шариков, шероховатость поверхности и др.

Момент трения в подшипниках качения

$$T_{mp} = 0,5 \cdot f_r \cdot F_r \cdot d \quad \text{или} \quad T_{mp} = 0,5 \cdot f_a \cdot F_a \cdot d, \quad (4.4)$$

где k – коэффициенты трения при радиальной и осевой нагрузках, отнесенные к диаметру вала ;

d - диаметр вала;

F_r, F_a - радиальные и осевые нагрузки.

Сила трения в подшипниках качения увеличивается в случае технологических и монтажных погрешностей, повышенных скоростей и при трении в уплотнениях. Значения коэффициентов трения в различных видах подшипников качения находятся в диапазоне $0,002 \dots 0,008$.

Избирательный перенос – особый вид трения

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

Таким образом, ИП можно характеризовать как вид трения с новым смазочным материалом, при котором самопроизвольно в процессе работы на поверхностях трения образуется тонкая пластичная пленка металла, в которой происходят сдвиговые деформации. При самом простом рассмотрении ИП можно представить как трение двух деталей, между которыми имеется смазочный материал в виде пластичного металла.

Более подробно ИП будет рассмотрен далее.

Лекция 6

Основные понятия о механизме изнашивания пар трения

Пара трения – два узла машины, контактирующие поверхностями в условиях эксплуатации или испытаний. Разрушение поверхностей твердого тела, проявляющееся в изменении его размеров или формы (массы), называют изнашиванием.

Износ - результат изнашивания, выраженный в единицах длины, объема, массы.

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

Механизм изнашивания металлических поверхностей

В процессе изнашивания выделяют три явления:

взаимодействие поверхностей трения;

изменения, происходящие в поверхностном слое металла;

разрушение поверхностей.

Эти явления непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей. Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Адгезия не

только обуславливает необходимость приложения касательной силы для относительного сдвига поверхностей, но и может привести к вырыванию материала. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки. Изменения на поверхностях трения обусловлены пластической деформацией, повышением температуры и химическим действием окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией, заключаются в следующем:

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

Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Пластическое деформирование твердых тел складывается из четырех наиболее важных элементарных процессов: 1) скольжения по кристаллографическим плоскостям (скольжение в отдельных зернах поликристаллического тела происходит обычно по нескольким плоскостям, число которых возрастает с повышением напряжения); 2) двойникования кристаллов; 3) отклонения атомов от правильного расположения в решетке и их теплового движения; 4) разрушения структуры. Разрушение структуры - это заключительный этап пластической деформации.

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

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

Влияние повышения температуры состоит в следующем:

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

Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам, в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом).

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

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

При микроскопическом исследовании контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена возможность образования магмы-плазмы (рис.6.1).

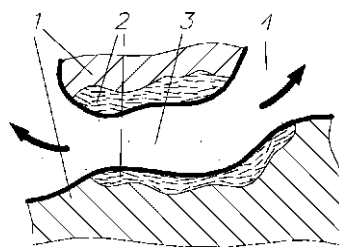


Рисунок 6.1 – Модель магмы-плазмы: 1 - исходная структура; 2 - расплавленная структура; 3 - плазма; 4 - электроны, движущиеся при трибоэмиссии

Химическое действие среды заключается в следующем:

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

Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли окисных пленок.

Пленки эффективно защищают поверхность от изнашивания, если скорость их образования превышает скорость изнашивания.

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

Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание. Элементарные виды разрушения поверхностей трения следующие:

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

Царапание. Образовавшаяся или появившаяся на поверхности трения частица при скольжении перемещает в стороны и поднимает материал, оставляя царапину.

Последняя обрывается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического контакта, при раздроблении частицы, ее впрессовывании или износе за пределы области трения.

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

Выкрашивание.

Это распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях качения.

Для выкрашивания характерна произвольная форма ямок с рваными краями.

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

Перенос материала.

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

По сравнению с трением без смазочного материала трение при граничной смазке может снизить перенос в 20 000 раз и более.

Усталость при изнашивании металлических поверхностей

Впервые на усталостную природу изнашивания при трении скольжения указал Д.В. Конвисаров. Причины усталости поверхностного слоя деталей он усматривал в повторных или знакопеременных движениях деталей машин. Однократное задираание поверхностей, царапание их различными твердыми острями не относятся к процессам изнашивания в полном смысле этого понятия. Он пришел к выводу, что изнашивание твердых тел при трении сходно с разрушением их от усталости. Пятно контакта испытывает многократное воздействие (тепловое, механическое)

других пятен контакта. В результате в материале образуется трещина, и происходит его разрушение.

Усталостная теория изнашивания базируется на молекулярно-механической теории трения.

Изнашивание - отделение частиц материала размером от долей микрона до микрона и более из-за многократного воздействия нагрузок и температуры на единичные неровности. Накапливаются необратимые изменения, появляются трещины и отделяются частицы.

Изнашивание - это результат нарушения фрикционных связей, оно зависит от отношения глубины внедрения к радиусу единичной неровности h/r и от отношения тангенциальной прочности молекулярной связи τ к пределу текучести материала основы σ_T (физико-механическая характеристика), т.е.

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_T}\right): \tau_T = (0,6 \dots 0,8) \sigma_T \dots \dots \dots (6.1)$$

По Н.В. Крагельскому, существует 5 видов нарушения фрикционной связи (табл. 6.1):

Таблица 1 - Виды нарушения фрикционной связи

Характер деформирования	Упругое оттеснение	Пластич. оттеснение	Микро-резание	Адгезионное нарушение (разрушение пленок)	Когезионный отрыв (глубинное вырывание)
	1	2	3	4	5
Схема					
Число циклов N , приводящих к разрушению основы	$N \rightarrow \infty$	$1 < N < \infty$	$N \rightarrow 1$	$N \rightarrow \infty$	$N \rightarrow 1$
Условие осуществления	$\frac{h}{r} \cdot 0,01 - \frac{h}{r} \cdot 0,0001$ черные металлы;	$\frac{h}{r} \cdot 0,01 - \frac{h}{r} \cdot 0,0001$ черные металлы;	$\frac{h}{r} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T}\right)$	$\frac{d\tau}{dh} \cdot 0$	$\frac{d\tau}{dh} \cdot 0$

Упругое оттеснение - если напряжение в контакте меньше σ_T (износ из-за усталости).

Пластическое отеснение - когда $\sigma_n = \sigma_t$ - металл обтекает контртело (малоцикловый износ, пластическое деформирование).

Микрорезание - $\sigma_n > \sigma_t$.

Адгезионное нарушение фрикционной связи - разрушение пленок: не приводит к разрушению, но влияет на величину контактных напряжений, когда пленка менее прочна, чем основа (прочность с глубиной растет).

Когезионный отрыв - прочность пленки выше прочности основы (прочность с глубиной падает - глубинное вырывание).

Механизм изнашивания полимеров и резины

При контакте металла с эластичным материалом шероховатость поверхности металла не оказывает сильного влияния на трение, т.к. при отсутствии пластической деформации на перемещение затрачивается меньшая работа (либо механическая, либо молекулярная). Для уменьшения трения и снижения износа полимерного материала в него добавляют различные активные вещества, которые в процессе трения взаимодействуют с рабочими поверхностями пары трения. Значительное влияние смазочного материала на коэффициент трения можно объяснить различием физико-химических свойств материалов.