

ТРИБОТЕХНИКА

Курс лекций

Литература

- 1. Триботехника (износ и безызносность). Гаркунов Д. Н. Издательство: Издательство МСХА Год: 2001 .
- 2. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Чичинадзе А.В. Издательство: Машиностроение Год: 2001
- 3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.; ил.
- 4. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Автор: Крагельский И.В. Издательство: Машиностроение Год: 1978

ВВЕДЕНИЕ

1. Значение и задачи курса “Триботехника”.
2. Предмет и объект ее изучения.
Основные термины и понятия.
3. Историческая справка развития триботехники.
4. Экономические причины появления науки о трении и износе.
5. Триботехнические системы и модели.
Узлы трения в машинах и механизмах, их классификация.

Основные задачи дисциплины

- изучение строения и свойств поверхностных слоев твердых тел,
- изучение закономерностей трения и процессов разрушения материалов при разных видах и условиях изнашивания,
- ознакомление с распространенными фрикционными и антифрикционными материалами.

Основные термины и

понятия.

- **Триботехника** представляет собой упорядоченные знания о практическом применении трибологии.
- Трибология (трайбология, трибология – от греч. *tribos* – трение и «логос» – наука) как научная дисциплина охватывает экспериментальные и теоретические исследования физических, механических, электрических, тепловых, химических, биологических и других явлений, связанных с трением.
- В последнее время в пределах триботехники начали развиваться следующие разделы – трибомеханика, трибохимия, трибофизика.
- **Трибомеханикой** называют раздел триботехники, изучающий механику взаимодействия контактирующих поверхностей при трении с точки зрения законов рассеяния энергии, импульса, а также механическое подобие, реверсивное трение, уравнения гидродинамики и т.д.
- **Трибофизика** изучает взаимодействие контактирующих поверхностей с физической точки зрения.
- **Трибохимия** исследует реакции, протекающие при трении твердых тел, химические основы избирательного переноса, воздействие на поверхности деталей химически активных веществ, проблемы коррозии при трении.

- Ряд терминов триботехники как науки стандартизован (ГОСТ 23.002-78).
- Рассмотрим основные термины.
- ***Внешнее трение*** – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией (рассеянием) энергии.
- ***Внутренне трение*** – явление сопротивления относительно перемещению частиц одного и того же тела.

- **Сила трения** – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной к общей границе между телами.
- **Коэффициент трения** – отношение силы трения между телами к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.
- **Трение покоя** – трение двух тел при микросмещении без макросмещения.
- **Трение движения** – трение двух тел, находящихся в относительном движении.
- **Трение скольжения** – трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел в точках касания различны по значению и (или) направлению.
- **Трение качения** – трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел одинаковы по значению и направлению, по крайней мере, в одной точке зоны контакта.

- **Трение качения с проскальзыванием** – трение движения двух соприкасающихся тел при одновременном трении качения и скольжения в зоне контакта.
- **Трение без смазочного материала** – трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала всех видов.
- **Трение со смазочным материалом** – трение двух тел при наличии на поверхностях трения введенного смазочного материала всех видов.
- **Изнашивание** – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.
- **Механическое изнашивание** – изнашивание в результате механических воздействий.

- **Абразивное изнашивание** – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц.
- **Гидрабразивное изнашивание** – изнашивание в результате воздействия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа).
- **Гидроэрозионное изнашивание** – изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости или газа.
- **Усталостное изнашивание** – механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности трения (может происходить как при качении, так и при скольжении).
- **Кавитационное изнашивание** – механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное ударное давление и высокую температуру.

- **Фреттинг** – механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении.
- **Изнашивание при заедании** – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникающих неровностей на сопряженную поверхность.
- **Коррозионно-механическое изнашивание** – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрохимическим взаимодействием материала со средой.
- **Электроэрозионное изнашивание** – изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

- **Износ** – результат изнашивания, проявляющийся в виде отделения или остаточной деформации материала и определяемый в установленных единицах.
- Износ может выражаться в единицах длины, объема, массы и т.д.
- **Скорость изнашивания** – отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник.
- Различают мгновенную и среднюю скорость изнашивания.
- **Интенсивность изнашивания** – отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.
- **Износостойкость** – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.
- **Скачкообразное движение при трении** – явление чередования относительного скольжения и относительного покоя или чередование увеличения и уменьшения относительной скорости скольжения, возникающее самопроизвольно при трении движения.

- **Схватывание при трении** – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего при трении вследствие действия молекулярных сил.
- **Перенос материала** – явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности другого.
- **Заедание** – процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала.
- **Задир** – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.
- **Царапание** – образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов тела или твердых частиц.
- **Отслаивание** – отделение с поверхности трения частиц материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

- **Выкрашивание** – образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.
- **Приработка** – процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.
- **Газовая смазка** - смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется газовым смазочным материалом.
- **Жидкостная смазка** – смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется жидким смазочным материалом.

- **Твердая смазка** – смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется твердым смазочным материалом.
- **Гидродинамическая смазка** – жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости при относительном движении поверхностей.
- **Смазка** – действие смазочного материала, в результате которого уменьшается износ, повреждения поверхности и (или) сила трения.
- **Смазывание** – подведение смазочного материала к поверхности трения.
- **Смазочный материал** – материал, подаваемый в зону трения и обеспечивающий смазывание (масляным туманом, погружением, под давлением, твердым покрытием, разбрызгиванием и другими способами).

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

- 1. Строение и физико-химические свойства поверхностных слоев.
- 2. Дефекты кристаллического строения поверхностных слоев.
- 3. Механические свойства слоев и их изменение по глубине. Геометрические характеристики поверхностных слоев реальных твердых тел.
- 4. Профиль поверхности. Форма микронеровностей. Распределение вершин микронеровностей по высоте.
- 5. Сферическая модель шероховатой поверхности.

Строение и физико-химические свойства поверхностных слоев.

Качество поверхности деталей характеризуется :

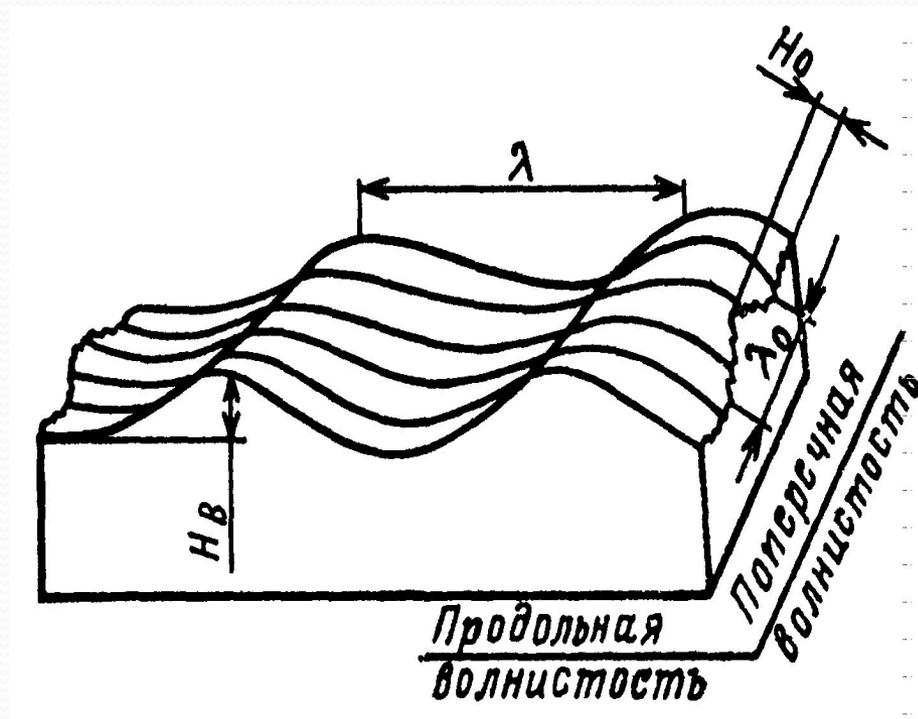
- *микро-и макрогеометрией* поверхности,
- *волнистостью,*
- *структурой,*
- *упрочнением и остаточными напряжениями.*

- **Макрогеометрическими** называют отклонения формы поверхности от заданной.
- Например, детали с боковой поверхностью в форме кругового цилиндра могут иметь следующие погрешности: отклонения контура от окружности (*овальность, огранка*); отклонения от прямолинейности образующих при прямолинейности оси цилиндра (*бочкообразность*); отклонения от прямолинейности образующих (*конусность*); *криволинейность оси*.

Причины возникновения макрогеометрических погрешностей поверхности:

- низкая точность станка, на котором происходит обработка,
- погрешность установки заготовки,
- силовые и температурные деформации системы станок – заготовка – инструмент,
- износ инструмента в процессе обработки детали.

Волнистость - это совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышений и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту



- Схема поперечной и продольной волнистости

Причины возникновения волнистости:

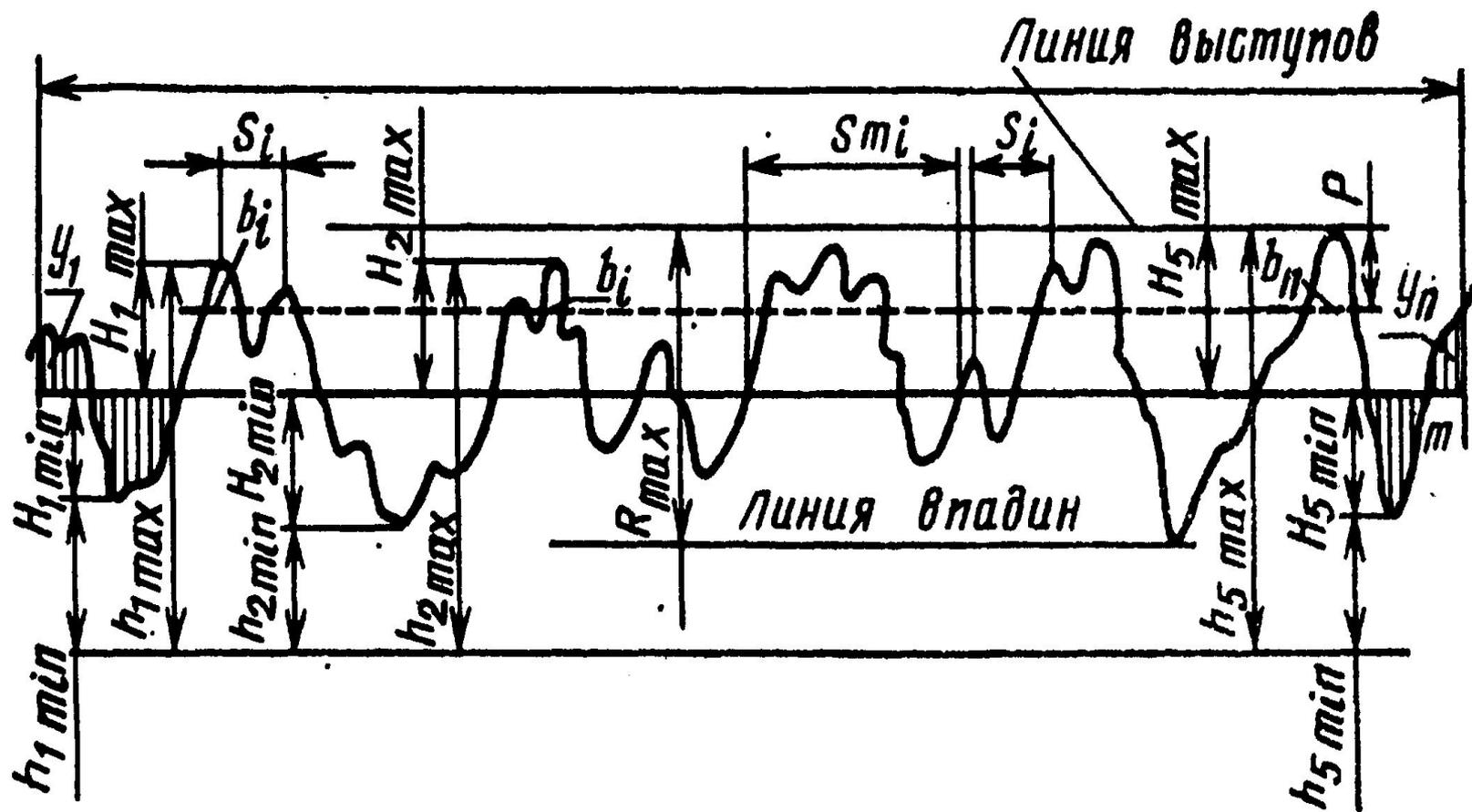
- неравномерность подачи при точении и шлифовании,
- вынужденные колебания системы станок – приспособление – инструмент – деталь, возникающих из-за неравномерности силы резания, наличия неуравновешенных масс,
- волнистости режущего инструмента,
- искажения формы шлифовального круга и неравномерного его износа,
- погрешности движения инструмента или заготовки

- **Микрогеометрия** поверхности характеризуется неровностями, т.е. выступами и впадинами с относительно малым расстоянием между ними.
- **Шероховатость** поверхности – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине.
- Графическое изображение реального профиля по данным измерений шероховатости называют **профилограммой шероховатости**

ГОСТ 2789 – 73 предусматривает шесть параметров, характеризующих шероховатость поверхности:

- три высотных – Ra , Rz и $Rmax$ (среднее арифметическое отклонение профиля, высота неровностей по десяти точкам и наибольшая высота неровностей профиля),
- два шаговых – S и Sm (средний шаг неровностей профиля по вершинам и средний шаг неровностей профиля)
- относительная опорная длина профиля t_p .

Профилограмма поверхности



- Средним арифметическим отклонением профиля Ra называют среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l
- При приближенных вычислениях может использоваться следующая зависимость

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

где $y(i)$ - отклонение профиля от средней линии в произвольном сечении;
 n - число разбиений профиля поверхности.

Высота микронеровностей, определяемая по десяти микронеровностям в пределах базовой длины, вычисляется по формуле:

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{i=5} |H_{\max i}| + \sum_{i=1}^{i=5} |H_{\min i}| \right),$$

- где $H_{\max i}$, $H_{\min i}$ - максимальное отклонение от средней линии профиля поверхности соответственно микровыступов и микровпадин.

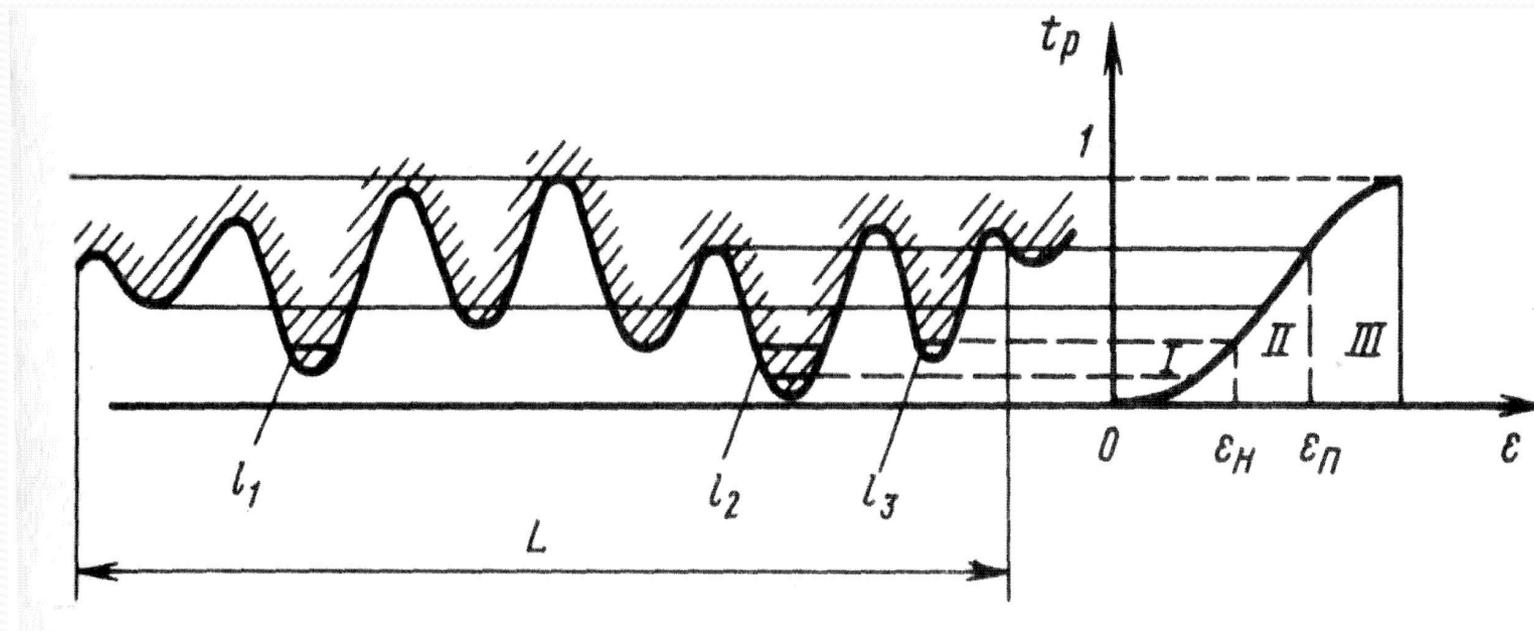
- Максимальная высота микронеровности определяется как расстояние между линией впадин и линией выступов профиля поверхности.
- Средним арифметическим шагом микронеровностей называют расстояние между двумя точками пересечения одноименных поверхностей соседних микронеровностей со средней линией профиля поверхности

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

где n - число выступов, обычно используемых при определении (не менее 5);
 S_{mi} - шаг произвольной микронеровности.

На профилограмме положение средней линии профиля определяют так, чтобы площади выступов и впадин по обе стороны от выбранной линии до контура профиля были равны.

Построение опорной кривой



- Распределение материала в шероховатом слое твердого тела задается опорной кривой профиля поверхности t_p , которая позволяет судить о распределении вершин микронеровностей по высоте.

Остаточные напряжения

- Остаточными называют напряжения, которые существуют в теле при отсутствии силовых воздействий на него.
- Остаточные напряжения первого рода (макронапряжения) сравнимы с размерами детали.
- Микронапряжения (остаточные напряжения второго рода) проявляются в пределах кристаллитов или их групп.
- Субмикронапряжения (остаточные напряжения третьего рода) уравниваются в пределах небольших группах атомов.

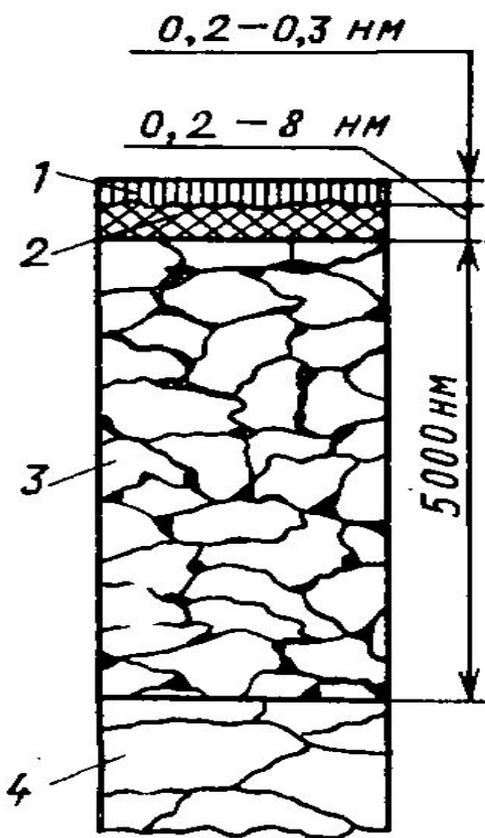
- Остаточные напряжения в поверхностном слое при механической обработке могут достигать значительной величины – 560 – 1000 МПа.
- Возникающие *напряжения могут быть сжимающими и растягивающими. Под действием высоких внутренних напряжений растяжения возникают шлифовочные трещины. Остаточные напряжения растяжения снижают предел выносливости детали.*
- После обработки поверхностные слои деталей упрочняются, о чем свидетельствуют данные об измерении микротвердости материала, полученные в большинстве случаев в результате внедрения в испытываемую поверхность соответствующего индентора

- Прочные и хрупкие металлы менее склонны к упрочнению, чем малопрочные и вязкие. К тому же температура при резании высокопрочных металлов значительно выше, и сильнее сказывается фактор разупрочнения.
- Наклеп металла под выступами неровностей обычно больше, чем под впадинами.
- Беспорядочно расположенные в исходной структуре металла кристаллические зерна при пластической деформации приобретают однородную ориентацию (*текстуру*).
- *Пластическая деформация при резании металлов обуславливает изменение микроструктуры. Более глубокие изменения возможны при обработке металлов, воспринимающих закалку. В результате высокого поверхностного нагрева, а также быстрого охлаждения возможны фазовые превращения и структурные изменения.*

- *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.
- Прижоги являются структурными концентраторами напряжения, понижающими как сопротивление усталости и износостойкость.

- При резании металлов протекают два противодействующих друг другу процесса: упрочнение в результате действия сил резания, которое 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.

Структура поверхностного слоя шлифованной и полированной 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.

- 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 – 0 – 2 мкм.
- Следует иметь в виду, что шлифовочные прижоги могут достигать глубины 5 мм.
- Микроскопическая неоднородность физико-механических свойств характерна для всякого твердого тела. В металлах она обусловлена анизотропией кристаллов.

- Дефекты структуры имеют и атомный характер. Атомы кристаллической решетки металла непрерывно совершают беспорядочные колебания около положения равновесия с тем большим размахом, чем выше температура. В некоторых случаях размах колебаний некоторых атомов становится таким, что они покидают свои места в решетке, нарушая тем самым кристаллический порядок.
- Система дефектов – слабых мест поверхности детали – является основой, 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.*

Физико-химические свойства поверхностей деталей

- Практически все металлы в процессе обработки покрываются окисными пленками, которые предотвращают их дальнейшее окисление. Оксидная пленка испытывает растяжение или сжатие в зависимости от соотношения объема основного металла и образовавшегося окисла на его основе. Толщина пленки оказывает влияние на ее способность сопротивляться деформированию. При некоторой толщине пленки происходит потеря её устойчивости и пленка разрыхляется. Обычно пленки окислов обладают меньшей поверхностной энергией, чем поверхности чистого металла,

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.

- 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.

Адсорбция и хемосорбция

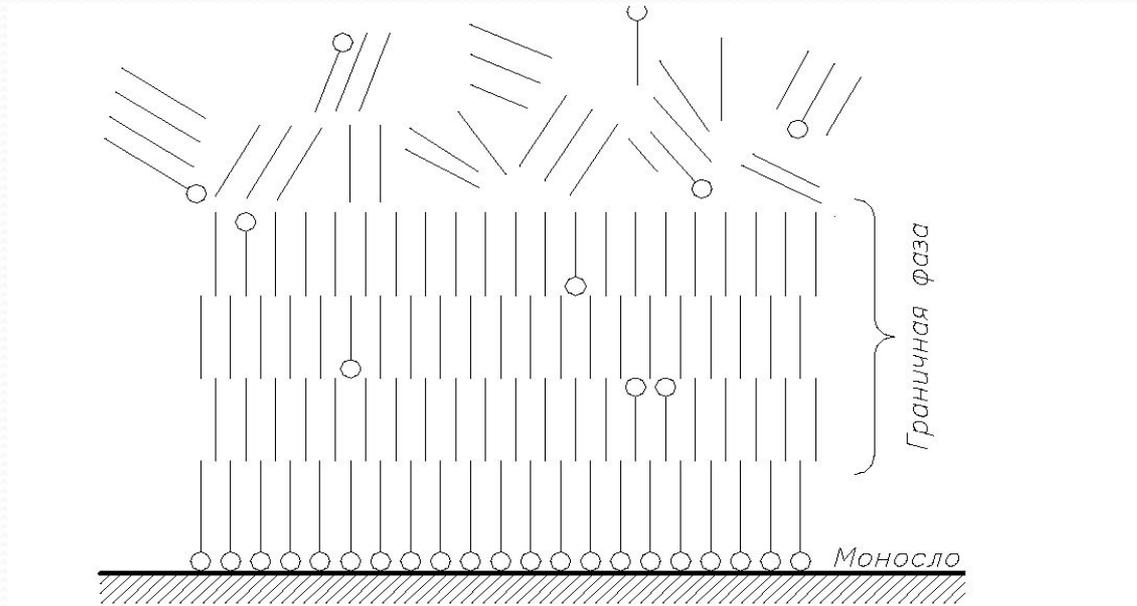
- Явления образования на поверхности твердого тела тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ, либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют адсорбцией.
- При химической адсорбции (хемосорбции) полярные концы молекул, связываясь с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный 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.

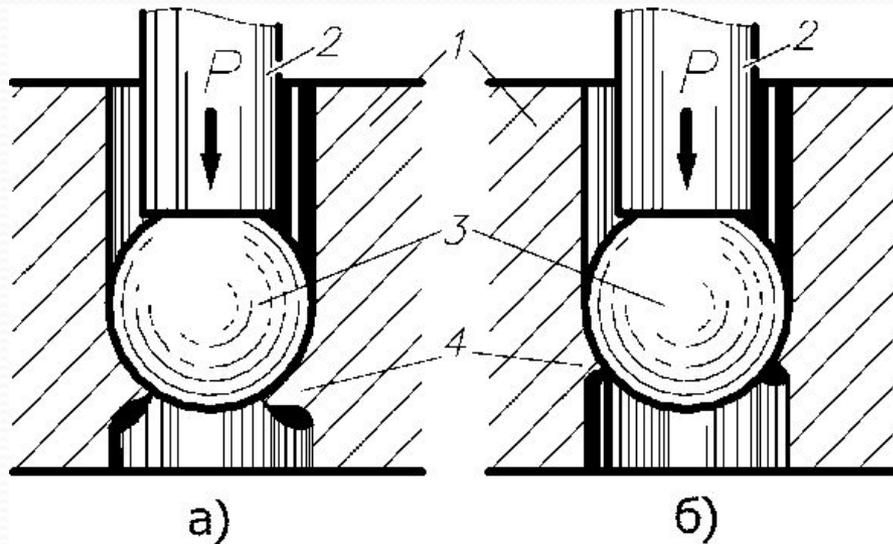
Схема адсорбированного монослоя полярных молекул и ориентация неполярных молекул



- 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

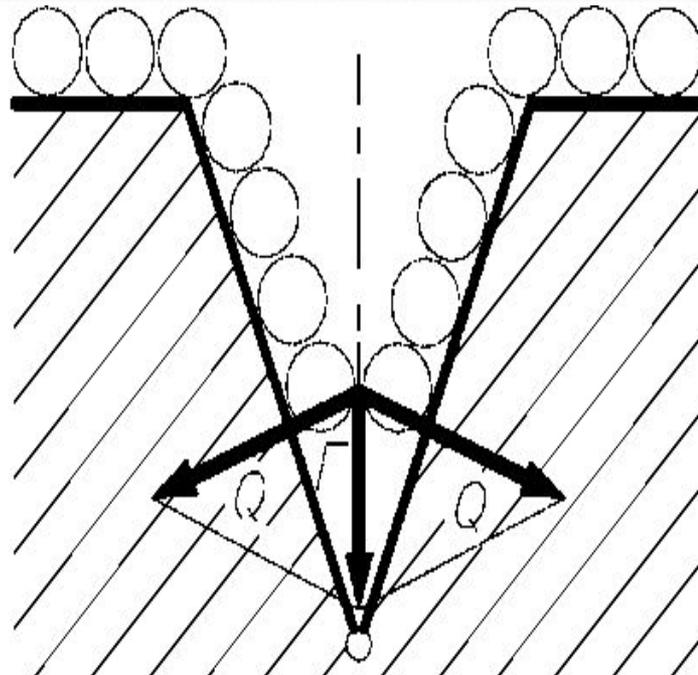
- П.А. Ребиндером установлено, что поверхностно активная среда значительно снижает сопротивление деформированию (в холодном состоянии) и разрушению твердых тел в результате физической адсорбции поверхностно активных веществ.
- Эффект Ребиндера является внешним эффектом: снижается поверхностная энергия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

Принципиальная схема эксперимента П.А. Ребиндера



Молекулы поверхности активной среды проникают в трещины и "раздвигают их"

- 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



- Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала (P - давление адсорбированного слоя; Q - расклинивающие силы)

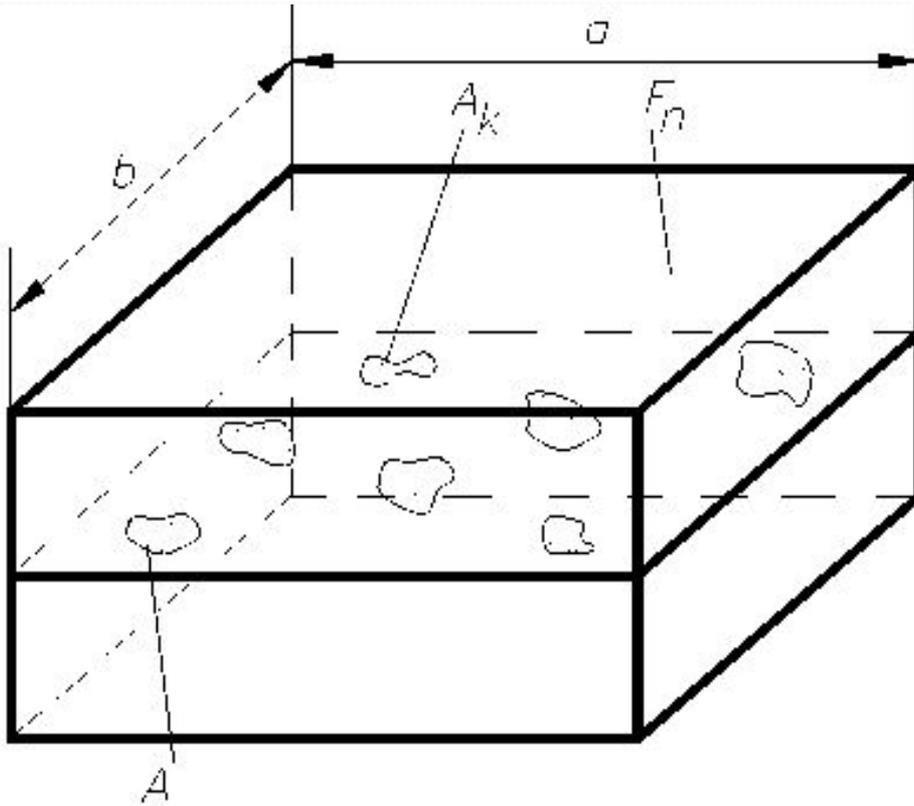
- Эффект Ребиндера лежит также в основе облегчения резания пластичных тел (металлов) под влиянием влиянием поверхностно-активных компонентов смазочно-охлаждающих жидкостей

КОНТАКТИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Деформации выступов делят:

- на упругие (эластичные тела - например, резина с очень гладкой поверхностью);
- упруго пластические без упрочнения;
- упруго пластические (упруго пластический контакт) с упрочнением.

Схема контакта поверхностей двух тел



- номинальную площадь контакта, $A_a = a \cdot b$;
- контурную площадь контакта, $A_k = 5 \dots 15 \% \text{ от } A$;
- фактическую площадь контакта, $A_r = 0,01 - 0,1 \% \text{ от } A$

- Номинальное давление

$$p_h = p_a = \frac{N}{A_a}$$

- Контурное давление

$$p_k = \frac{N}{A_k}$$

- Фактическое давление

$$p_r = \frac{N}{A_r}$$

- Фактическая площадь контакта A_f зависит от нагрузки за счет деформации вершин выступов и меняется после 1-й и последующей нагрузки.
- Увеличивается при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости, росте радиуса закруглений выступов r и за счет времени действия нагрузки.
- Уменьшается с увеличением предела текучести, высоты неровности (шероховатости).
- При взаимодействии двух разных материалов - физические свойства более мягкого и геометрия поверхности более твердого из тел определяют A_f (фактический контакт).

- Контурные площадки легко обнаруживаются при проверке качества сопряжения деталей на краску – это пятно касания.
- Процесс контактирования при статическом нагружении:
 1. Контакт вершинами выступов неровностей на высоте мароотклонений.
 2. Деформация основ и их неровностей, вызывающих сближение поверхностей.
 3. Контакт выступов с меньшей суммой высот.

При смятии микронеровностей деформируемый материал равномерно распределяется по всей поверхности микронеровностей, при этом контакт может быть как *насыщенным* так и *ненасыщенным*.

- ***Ненасыщенный контакт*** - такая разновидность контактирования твердых тел, когда число контактирующих микронеровностей меньше числа микронеровностей, расположенных на контурной площади касания (используется при описании процесса контактирования неподвижных тел).
- ***Насыщенный контакт*** - разновидность контактирования твердых тел, когда происходит внедрение более жестких микронеровностей в менее жесткую поверхность одного из тел. Внедрение происходит, когда жесткое тело имеет более шероховатую поверхность, различия в механических свойствах поверхностных слоев и геометрических параметрах микронеровностей.

- Площадь фактического контакта зависит от волнистости и шероховатости поверхностей, физико-механических свойств поверхностного слоя и от нагрузки и составляет от одной десятитысячной до одной десятой номинальной площади касания. При высоких нагрузках площадь фактического контакта не превышает 40% номинальной площади.
- При контактировании двух деталей из различных материалов площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхностного слоя более твердого материала.

- При наличии между поверхностями трения тонкой медной пленки, образуемой в условиях режима избирательного переноса (безызносного трения), площадь фактического контакта увеличивается до 100 раз, что позволяет существенно снизить интенсивность изнашивания.

Взаимное внедрение поверхностей

- Контактирование под нагрузкой поверхностей тел, из которых хотя бы одно поликристаллическое, а у другого однородная поверхность, связано с образованием шероховатости поверхности вследствие неоднородности деформации.
- Даже идеально гладкая поверхность с гетерогенной структурой, как и сопряженная с ней поверхность, приобретает под нагрузкой шероховатость.

- Технические металлы состоят из большого числа кристаллитов разного состава, ориентировки и формы с линейными размерами обычно от 0,001 до 0,1 мм. Свойства кристаллита, как и монокристалла, отличаются четко выраженной анизотропией, в то время как поликристаллу, у которого любая ориентировка составляющих малых кристалликов равновероятна, свойственна изотропность как результат статистической устойчивости свойств для всех направлений. У монокристалла константы упругости и предел упругости зависят от направления растягивающей силы. Так, модуль продольной упругости E монокристалла железа изменяется от 284 до 132 ГПа, тогда как для поликристалла $E=210$ ГПа, для монокристалла цинка $E_{\max}=123,6$ и $E_{\min}=34,3$ ГПа.

- Если поликристаллическому чистому металлу свойственна неоднородность кристаллического строения, то большинство сплавов обладают также неоднородностью различных структурных составляющих по твердости и имеют разную ориентировку кристаллических зерен, выходящих на поверхность. В результате на отдельных площадках фактического контакта, начиная с малых нагрузок, происходит взаимное внедрение твердых составляющих и кристаллов, обращенных к поверхности "сильными" гранями, в менее твердые структурные составляющие и "слабые" грани кристаллов.
- Неоднородность металла, вызванная всевозможными включениями, сегрегацией примесей, трещинами, остаточными напряжениями и т. п., благоприятствует взаимному внедрению поверхностей.

- Для изнашивания поверхностей трения имеет значение не сам факт изменения их шероховатости, обусловленный неоднородностями строения металлов, а связанное с ним взаимное внедрение поверхностей.
- Глубина взаимного внедрения зависит от физико-механических свойств материалов, шероховатости поверхностей и нагрузки.