

# ТРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

# В настоящее время различные виды изнашивания сведены в классы

- *Адгезионное,*
- *окислительное ,*
- *коррозионно-механическое .*
- При адгезионном изнашивании увеличивается толщина пограничного слоя и при превышении зазора в сопряжении происходит заклинивание деталей и их поломка.
- Окислительное изнашивание протекает в неагрессивной среде в результате повышения температуры.
- Коррозионно-механическое характеризуется образованием вторичных структур вследствие химических или электрохимических реакций

# Характеристиками изнашивания являются :

- *линейный износ за время наработки,*
- *объемный и массовый износ со всей поверхности детали,*
- *износ сопряжения.*

- Для количественного описания процесса трения и изнашивания используют удельные (на единицу поверхности трения) характеристики потока материала, уносимого при разрушении за единицу наработки.
- К таким параметрам относят ***скорость изнашивания, интенсивность изнашивания и энергетический показатель изнашивания.***
- Величина, обратная интенсивности изнашивания, называется ***износостойкостью.***

# Классы износостойкости (КИ)

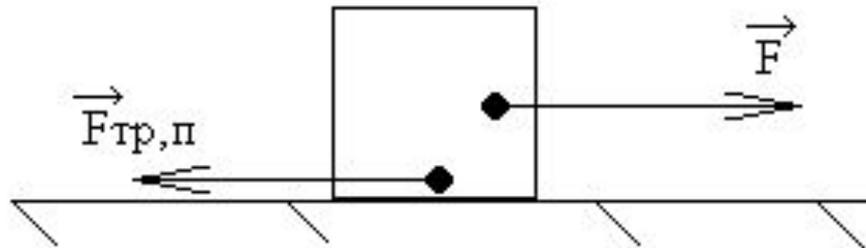
- Интенсивность линейного изнашивания является унифицированным показателем качества работы трибосопряжения. Эта величина изменяется в широких пределах и для отображения используется логарифмическая шкала. Устанавливается десять классов износостойкости - от 3 до 12 включительно, причем нижняя граница не входит в состав класса. Каждый класс разбит на пять разрядов (от 1 до 5). Для обозначения износостойкости устанавливается буквенно-цифровой символ, начинающийся буквами КИ и цифрами через косую черту: класс и разряд в данном классе.

**В зависимости от кинематических признаков относительного перемещения тел различают следующие виды трения:**

- трение покоя,
- трение скольжения,
- трение качения,
- трение верчения.

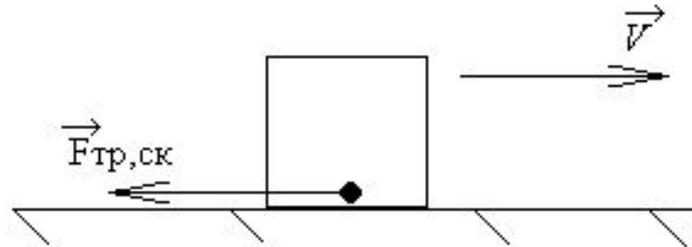
# ТРЕНИЕ ПОКОЯ

- Представляет собой сопротивление контактирующих тел их относительному перемещению, наблюдаемое при приложении нормальной и касательной нагрузок, не вызывающих изменение координат и разрушения пятен фактического контакта. При трении покоя возможно относительное смещение контактирующих тел, вызванное деформацией контактирующих неровностей и в меньшей степени объемной деформацией этих тел (фрикционные устройства, ременные передачи).



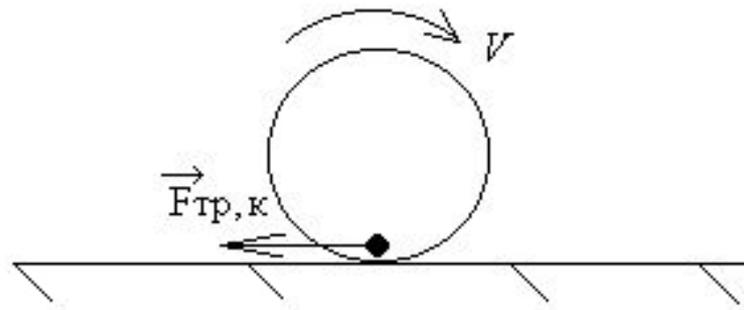
# ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

- Наблюдается при относительном перемещении контактирующих тел и сопровождается постоянной сменой выступов поверхности трения, вступающих в контакт. При трении скольжения сопрягаемые тела перемещаются так, что векторы скоростей на каждом общем контакте различны по модулю или направлению (пары направляющая – суппорт, вал – вкладыш, поршень - втулка).



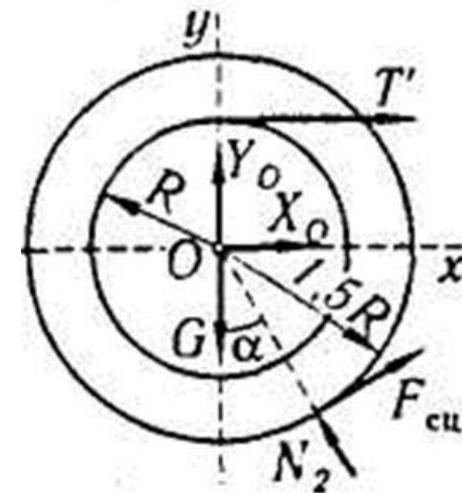
# Трением качения

- называется трение движения, при котором скорости соприкасающихся тел в точках касания одинаковы по значению и направлению. Это сопротивление взаимному перемещению контактирующих тел, при повороте одного из которых относительно мгновенной или постоянной оси в контакт вступают новые участки поверхностей трения (подшипники качения).



# ТРЕНИЕ ВЕРЧЕНИЯ

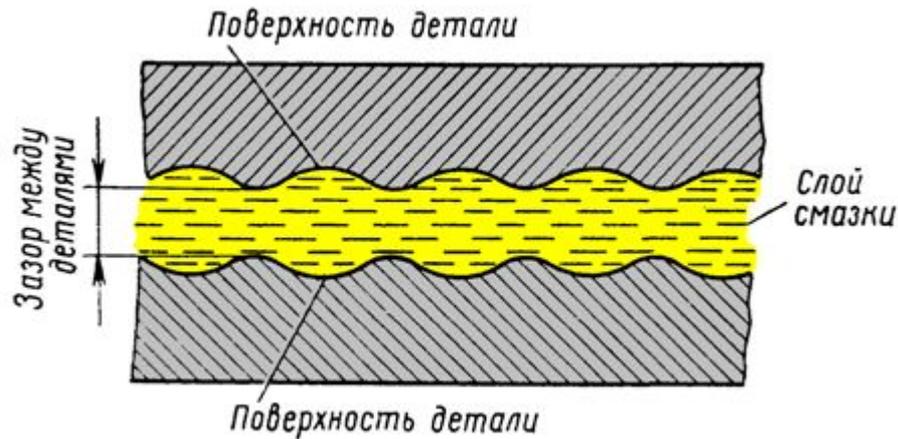
- Существование трение верчения можно установить экспериментально, рассматривая сферу на горизонтальной поверхности. Когда оба тела абсолютно твердые, то любая горизонтальная пара сил будет поворачивать сферу вокруг вертикальной оси. Однако из эксперимента известно, что сфера начнет поворачиваться, когда момент пары сил превысит некоторое значение  $m_l$ . Имеет место в опорах часовых механизмов, ограничных дисков, веретен. Характеризуется тем, что площадь обеих поверхностей трения одинакова. А скорости относительного перемещения различных точек этих поверхностей различны, зависят от их удаления от центра контактной площадки.



## В зависимости от наличия слоя, разделяющего контактирующие поверхности, различают:

- Трение без смазочного материала (сухое).
- Граничное трение .
- Жидкостное трение.
- Газодинамическое.

# Жидкостное трение



- При наличии смазочного материала, количества которого достаточно для проявления его объемных свойств, реализуется жидкостная смазка. Жидкостная смазка характеризуется тем, что поверхности трения разделены слоем жидкого смазочного материала (масла), причем последний находится под давлением.

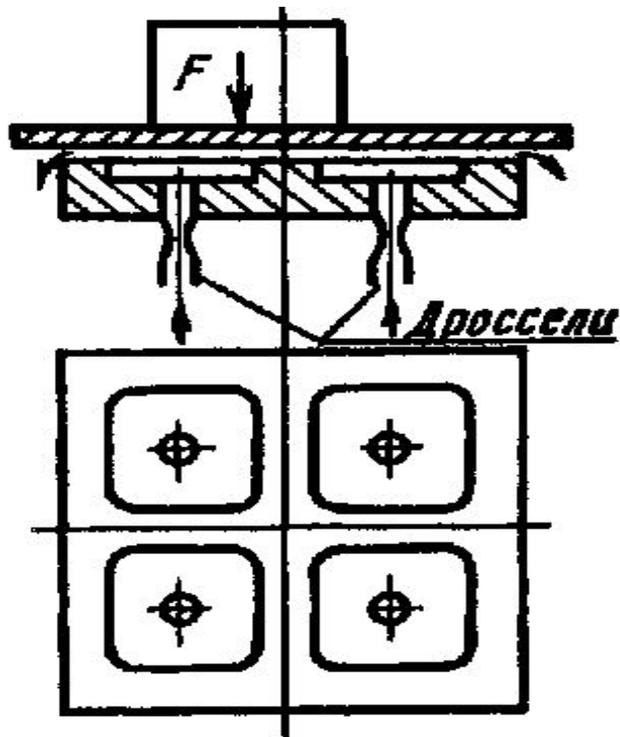
# Жидкостное трение

- Давление смазочного материала уравнивает внешнюю нагрузку. *Масляный слой* при этом называют *несущим*. При толщине слоя большей толщины граничной пленки уменьшается степень влияния поверхностей деталей на далеко отстоящие от них молекулы масла. Слои, находящиеся на расстоянии больше 0,5 мкм от поверхности, приобретают возможность свободно перемещаться один относительно другого.

# Жидкостное трение

- При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (*вязкостью*) масла и складывается из сопротивлений скольжению его слоев по толщине смазочного слоя. Этот режим трения характеризуется исключительно малыми коэффициентами трения и поэтому является оптимальным для узлов трения вследствие малых потерь энергии, долговечности и износостойкости. Причем сила трения при жидкостной смазке не зависит от природы сопрягаемых поверхностей.

# Существуют два способа создания давления в несущем слое.

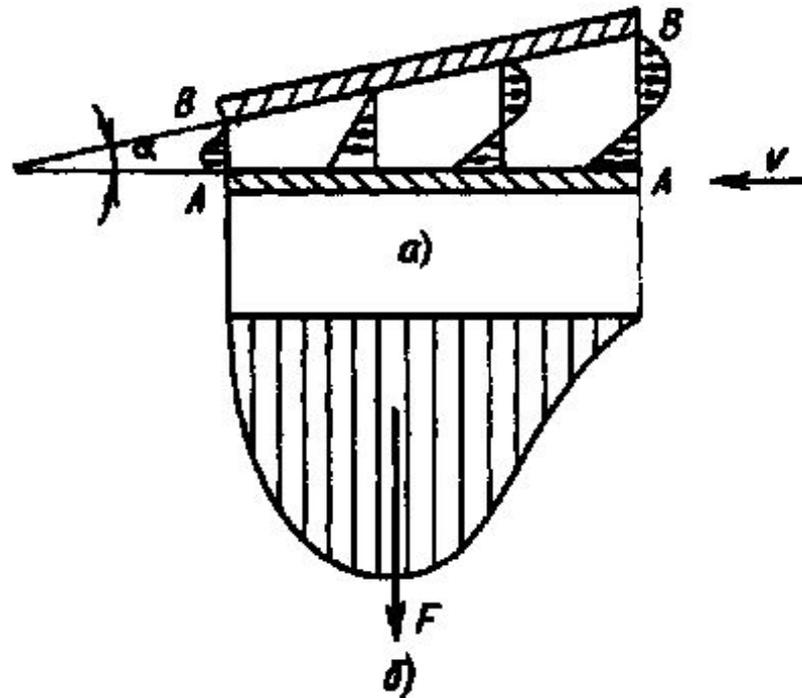


- При первом способе специально предусмотренный насос создает гидростатическое давление, достаточное для разделения поверхностей трения. На приведенном принципе работают так называемые *гидростатические опоры скольжения*. Утечка масла в подшипнике компенсируется соответствующей подачей

# Гидродинамический способ

- Давление в смазочном слое развивается автоматически. Такие опоры называют *гидродинамическими*. Для этого необходимы соответствующие конструктивные решения и подбор марки масса в зависимости от скорости скольжения.

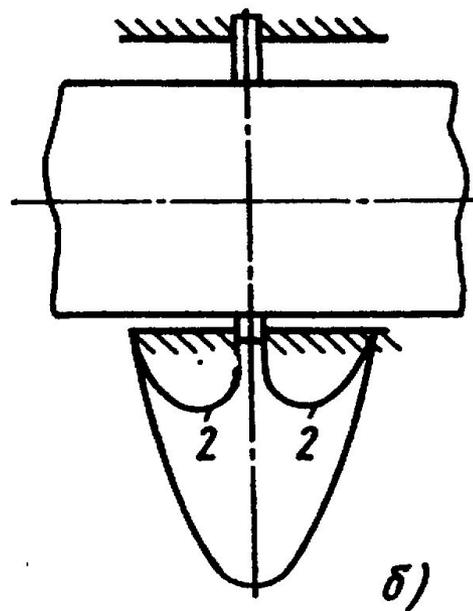
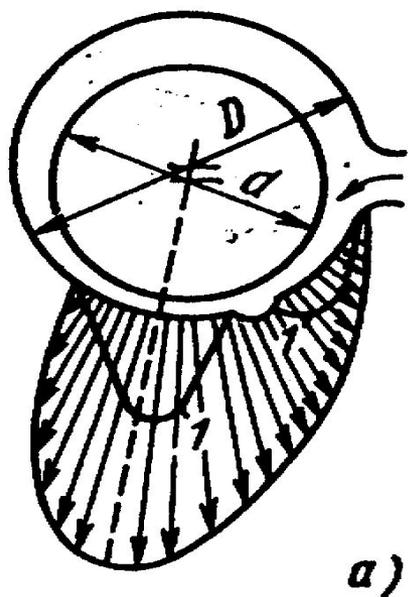
# Схема образования гидродинамического несущего слоя



- в подшипнике (а)
- распределение давления по длине зазора (б)

- Клиновы́й зазор является необходимым условием поддержания режима трения в гидродинамической опоре. В плоских опорах клиновы́й зазор создается конструктивно, с помощью скосов поверхности, как это имеет место в ползунах и кольцевых опорах, либо благодаря самоустановке опорной поверхности (упорные подшипники типа подшипника Мичелла).

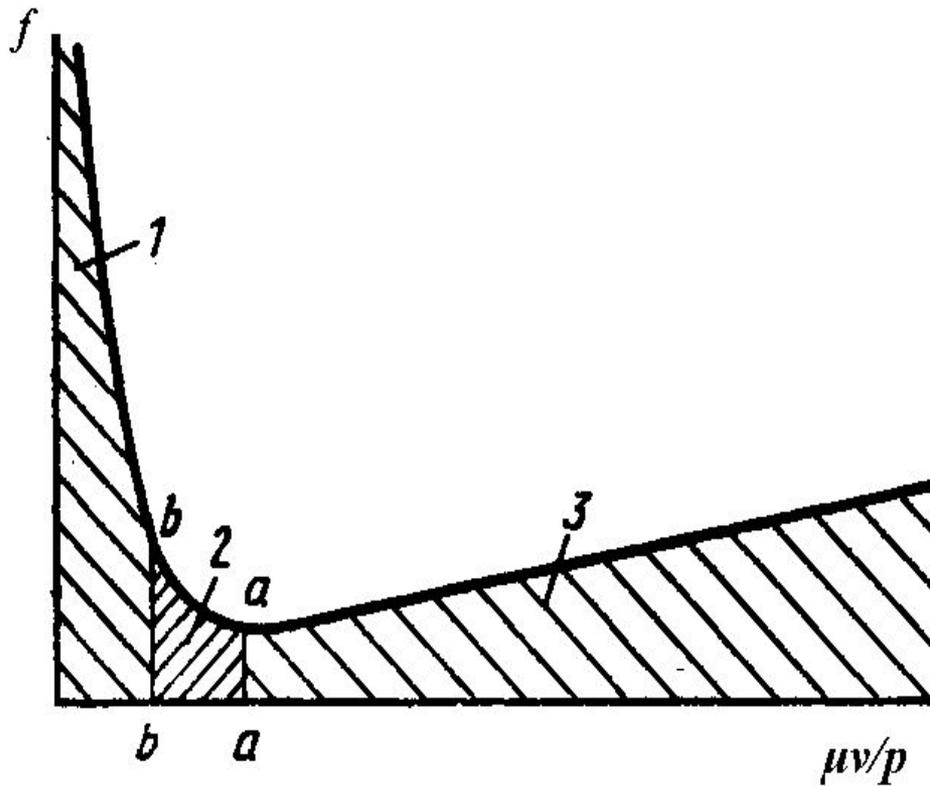
# Схема распределения давления



- в поперечном (а)
- продольном (б) сечении подшипника

- Для осуществления жидкостной смазки необходимо, чтобы наименьшая толщина смазочного слоя при гладких поверхностях и прочих идеальных условиях была не менее толщины, при которой проявляются объемные свойства жидкости. Для шероховатых поверхностей наименьшая толщина слоя – минимальное расстояние между вершинами выступов неровностей сопрягающихся поверхностей.
- Согласно прикладной гидродинамической теории смазки в качестве необходимого условия трения при жидкостной смазке минимальный зазор между поверхностями должен быть не менее суммы средних высот неровностей поверхностей, что позволяет избежать зацепления неровностей. При этом одно из тел трение должно «всплыть» не менее чем на сумму средних высот неровностей.

# Диаграмма режимов трения в подшипнике (диаграммой Герси)



- 1 - трение несмазанных поверхностей;
- 2 - режим трения при граничной и полужидкостной смазке;
- 3 - гидродинамическая смазка

# Режимы трения

- Режим трения определяется вязкостью  $\mu$  масла, скоростью скольжения  $v$  и давлением  $p$ . Совокупность приведенных параметров называют фактором  $\mu v/p$ . Для описания режима трения в подшипниках используют зависимость коэффициента трения от приведенного фактора, которую называют *диаграммой Герси*. Фактор  $\mu v/p$  является характеристикой режимов трения при полужидкостной и жидкостной смазке, при других видах трения вязкость смазочного материала обычно не принимают во внимание. Приведенная диаграмма может использоваться для анализа явлений в парах трения с возвратно-поступательным движением и подпятниках.

# ГРАНИЧНОЕ ТРЕНИЕ

- При граничной смазке поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины 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.

- Смазочный материал в граничном слое анизотропен, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и при определенной толщине слоя скользят друг по другу. По нормали к твердой поверхности пленка обладает высоким сопротивлением сжатию, достигающим десятки тысяч килограммов на  $1\text{см}^2$ . Деформация сжатия пленки в довольно высоком интервале давлений не выходит за пределы упругости.

# Механизм трения при граничной смазке

- Под нагрузкой происходит упругая и пластическая деформации на площадках контакта, под которыми понимают площадки наиболее близкого прилегания поверхностей, покрытых граничной пленкой смазочного материала, включая мономолекулярные слои. На площадках контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки. Сопротивление движению складывается из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления «пропахиванию» поверхностей внедрившимися в них объемами.

- На площадках контакта, подвергнутых наиболее значительной пластической деформации, и в местах с высокими температурами может произойти разрушение смазочной пленки с наступлением адгезии обнажившихся поверхностей и даже схватыванию металлов на микроучастках фактического контакта. Это вызывает дополнительное сопротивление движению.
- Благодаря подвижности молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что сообщает смазочной пленке свойство «самозалечиваться» при местных ее повреждениях. Это свойство смазочной пленки играет большую роль в предупреждениях лавинного процесса схватывания.

- 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).

# ТРЕНИЕ БЕЗ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

- Реализуется, когда сопрягаемые поверхности покрыты только оксидными пленками или адсорбированными пленками воды и газа (тормоза, фрикционные передачи узлы трения, где недопустимо использование смазочного материала или их применение невозможно вследствие высокой температуры в зоне контакта)

- Обычно для узлов трения, работающих без смазочных материалов, одно из сил трения изготавливают из композита, содержащего твердое смазывающее вещество (дисульфид молибдена, диселенид вольфрама, графит) или пластичные материалы. Твердые смазочные материалы, обладая слоистой структурой и низким сопротивлением сдвигу, снижают силу трения и интенсивность изнашивания трущихся тел.

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ

- Когда поверхности трения разделены слоем газа. Реализуется данный вид трения в высокоскоростных узлах с высокой точностью перемещения элементов пар трения, применяемых в ультрацентрифугах, турбокомпрессорах, точных приборах.

# ВНУТРЕННЕЕ И ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ

- Трение твердых тел сопровождается образованием и разрушением адгезионных связей между поверхностями соприкасающихся выступов. В зависимости от того, где происходит разрушение – на границе раздела выступов или в объеме поверхностного слоя одного из трущихся тел, различают внутреннее и внешнее трение.

# Внешнее трение

- Возникает, когда прочность адгезионных связей меньше когезионной прочности поверхностных слоев обеих трущихся тел, т.е. когда механические свойства этих тел увеличиваются по мере удаления от поверхности трения. Сдвиг происходит на поверхности контактирующих выступов.
- Характеризуется низким коэффициентом трения, дискретным характером разрушения и перемещением материала в направлении перпендикулярном поверхности трения.

# Внутреннее трение

- Наблюдается при условии, если прочность адгезионных связей больше когезионной прочности одного из трущихся тел. При этом сдвиг происходит в объеме поверхностного слоя, реализуется послойное смещение материала в направлении скольжения и происходит непрерывное превращение механической энергии, расходуемой на преодоление трения в теплоту.
- Такое трение возникает при обработке металлов давлением, волочением, фрикционном нагреве элементов пары трения до температуры, близкой к температуре плавления.

# ТЕОРИИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

- Адгезионная.
- Молекулярная.
- Молекулярно-кинетическая.
- Энергетическая.
- Молекулярно-механическая.

# Адгезионная теория трения

- Выдвинута Ф. Боуденом и Д. Тейбором.
- Боуден считает, что адгезия играет основную роль при трении тел, и трение нельзя рассматривать как поверхностное явление. В основе трения лежат объемные свойства материалов, такие, например, как соотношение твердостей трущихся тел, а при достаточно больших скоростях скольжения и соотношение температур плавления тел.

- Ввиду пластического течения материала на выступах поверхности удельное давление тел остается постоянным и не превышает предела текучести. Нормальная нагрузка определяется как произведение площади фактического контакта на предел текучести материала, т.е.
- С увеличением нормальной нагрузки удельное давление в зоне контакта, приблизительно равное пределу текучести, практически не меняется, а главным образом, происходит увеличение площади фактического контакта. Поэтому коэффициент трения согласно представлению Боудена выражается следующим образом:
- Пренебрегая сопротивлением пластического оттеснения материала, считая его равным одной десятой и менее от сопротивления разрушения мостиков сварки, коэффициент трения Боуден выразил как отношение сопротивления на срез к пределу текучести более мягкого материала.
- Развиваемая Боуденом и Тейбором теория является, по существу, справедливой лишь для пластического контакта при условии, что трение происходит при постоянном напряжении.

$$F = \frac{\tau}{c\sigma_T} N$$

- Т.е. вступающие в контакт неровности образуют «мостики сварки» благодаря адгезии на пятнах их контакта. Сила трения  $F$  обусловлена сопротивлением разрушению этих мостиков при относительном перемещении контактирующих тел.

# Молекулярная теория трения

- Впервые предложена И. Дезагюлье в 1734, получила развитие в XX веке в трудах В.Гарди, Г. Томлисона, Б.В. Дерягина.
- Положение основано на том, что трение обусловлено силами межмолекулярного или межатомного взаимодействия.
- При скольжении поверхностей происходит непрерывная смена пар молекул, уравнивающих нормальное давление, что сопровождается рассеянием энергии

# Молекулярно-кинетическая теория трения

- Разработана Г.М.Бартневым на основе гипотезы о природе трения резины, предложенной А. Шалломахом. Авторы предполагают, что эта теория применима для всех твердых полимеров.
- Сущность – цепь макромолекулы контактирует с поверхностью сопряженного тела в данной точке ограниченное время, а затем перескакивает в другую точку. Время контактирования цепей макромолекулы определяется ее тепловым движением.

- При отсутствии внешней силы вероятность перескока цепи в любом направлении одинакова, а приложение тангенциальной силы снижает потенциальный барьер и увеличивает вероятность перескока в направлении вектора скорости.
- Сила трения в этом случае растет с увеличением скорости скольжения, числа цепей молекул, находящихся в контакте с сопрягаемым телом, энергетического барьера, а также зависит от температуры и молекулярных констант полимера

# Энергетическая теория трения

- Основывается на положении о том, что затрачиваемая при трении энергия расходуется на тепловые, механические и электрические явления, а также на химические процессы, имеющие место в зоне контакта трущихся тел.
- Изучение связи силы трения с поверхностной энергией показало, что выбор пар трения должен осуществляться с учетом отношения поверхностной энергии материала  $W_p$  к эффективному напряжению на контакте  $p = c \cdot \sigma_t$ . Если отношение  $W_p/p$  минимально, материал обладает хорошими антифрикционными свойствами.

# Молекулярно-механическая теория трения

- Трение имеет двойную природу: молекулярную и механическую, т.е. трение обусловлено преодолением сил молекулярного взаимодействия на пятнах фактического контакта и сопротивлением деформируемого материала перемещению внедрившихся в его объем неровностей более жесткого тела.

# Молекулярно-механическая теория трения

- Трение определяется как результат взаимодействия всех выступов, имеющихся на реальном контакте. Оно зависит от микрогеометрии (высоты максимальной неровности, его радиуса закругления и показателей параболы, выражающей опорную поверхность), механических свойств (модуля упругости или твердости и прочности адгезионной связи) и внешних условий (нагрузки и скорости скольжения тел). Предполагается, что влияние температуры проявляется через изменение механических свойств трущихся тел.

# Основные положения молекулярно-механической теории трения

- Взаимодействие между трущимися телами осуществляется на дискретных участках контакта, составляющих ФПК.
- В силу того, что ФПК мала по сравнению с номинальной площадью контакта, на единичных пятнах контакта развиваются давления, достаточные для сближения контактирующих выступов и возникновения межмолекулярного взаимодействия между ними. Суммарная сила межмолекулярного взаимодействия между сближенными участками поверхностей трения представляет собой молекулярную составляющую трения.

# Основные положения молекулярно-механической теории трения

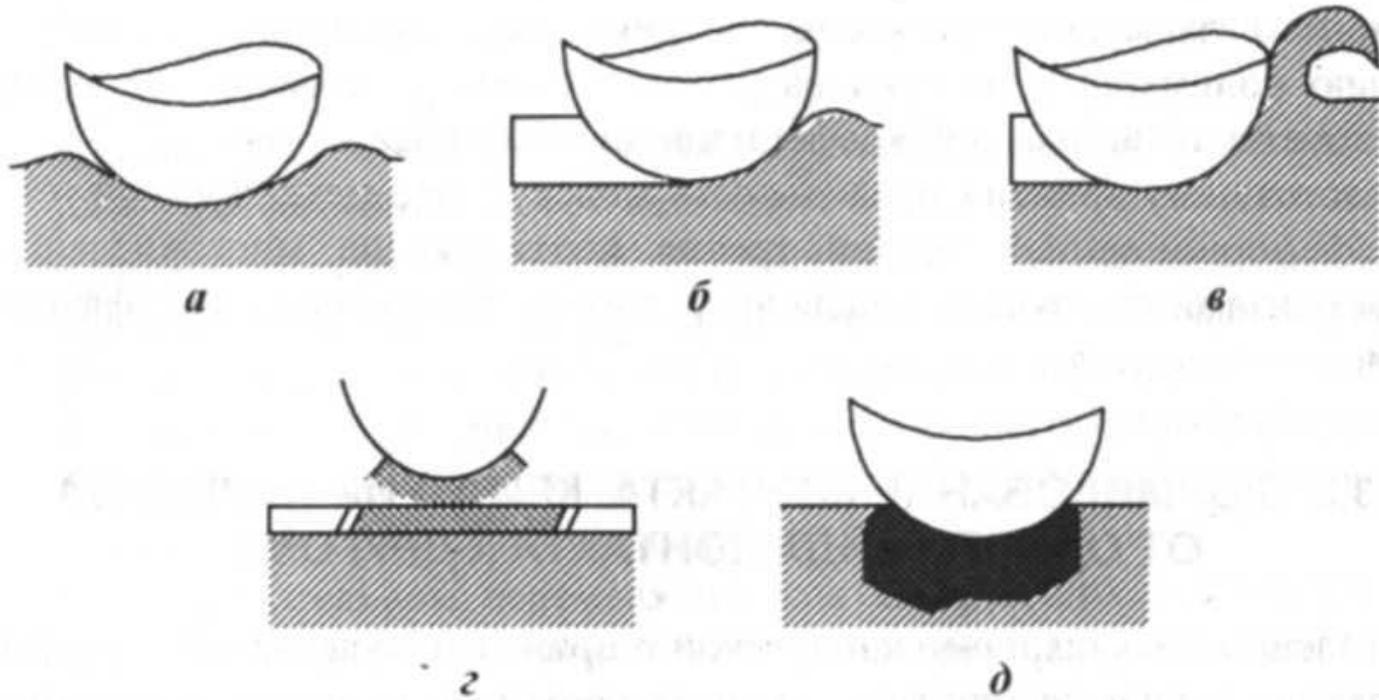
- При относительном перемещении контактирующих тел внедрившиеся выступы поверхности одного тела пропахивают более мягкий материал другого. Сопротивление этого материала перемещению в его объеме неровностей поверхности сопрягаемого тела обуславливает механическую составляющую трения.
- Поверхности трения реальных тел покрыты оксидными и адсорбционными пленками, поэтому межмолекулярное взаимодействие осуществляется не между самими телами, а между пленками различной природы. Это обеспечивает положительный градиент механических свойств по глубине – необходимое условие внешнего трения.

# Классификация видов нарушения фрикционных связей по степени механического и молекулярного взаимодействия (И.В. Крагельский)

- т. е. по глубине относительного внедрения неровностей и отношению тангенциальной прочности молекулярной связи  $\tau$  к пределу текучести деформируемого материала  $\sigma_T$ . Глубина относительного внедрения есть отношение глубины внедрения  $h$  неровности поверхности одного тела в объем другого или величины сжатия неровности к ее радиусу  $R$ .
- Если внедрившуюся неровность моделировать сферическим сегментом, то глубину ее внедрения  $h$  можно рассчитать по формуле

$$h = 240 \frac{\sigma_T^2}{E^2} R ,$$

# Виды разрушения фрикционных связей



- **a - упругое оттеснение, б-пластическое оттеснение; в - микрорезание; г- адгезионное разрушение пленок; д - когезионное разрушение материала**

## В зависимости от глубины относительного внедрения $h/R$ , неровности и прочности адгезионной связи $\tau / \sigma_{\tau}$ различают

- *Упругое оттеснение* материала имеет место, когда возникающие в контакте напряжения не превышают предел текучести деформируемого материала
- *Пластическое оттеснение* происходит при достижении контактных напряжений, по величине равных или превышающих предел текучести материала, который способен обтекать без разрушения внедрившуюся неровность.

- *Микрорезание* или срез материала внедрившейся неровностью наблюдается при разрушающих величинах контактных напряжений, приводящих к отделению материала в виде стружки при однократном проходе выступа.
- *Адгезионное разрушение* пленок наблюдается при таком виде фрикционных связей, когда их разрушение происходит по той же границе, по которой они образовались. Это разрушение требует незначительных усилий
- *Когезионное разрушение* фрикционной связи, наблюдаемое при схватывании поверхностей и сопровождающееся глубинным вырыванием, возникает, когда прочность адгезионной связи выше когезионной прочности деформируемого материала.

# Коэффициент трения

- Коэффициент трения будет определяться тем, какой из видов разрушения связей доминирует. При упругом оттеснении и схватывании пленок  $f$  принимает минимальное значение, при схватывании поверхностей - максимальное.

# Переход от упругого к пластическому оттеснению

- наблюдается, когда  $h/R > 0,01$  для стали и  $h/R > 0,0001$  для цветных металлов. При повторном нагружении нагрузка, меньшая или равная начальной, вызывает упругое деформирование, так как происходит наклеп и скругление (увеличение  $R$ ) неровностей. Для скользящего контакта переход от упругого к пластическому деформированию наблюдается при

$$\frac{h}{R} > \frac{2,4}{k^2 f^2} \left( \frac{\sigma_T}{E} \right)^2,$$

где  $k$  - коэффициент, изменяющийся в зависимости от принятой теории прочности от 1,5 до 3

# Переход от пластического оттеснения к микрорезанию

- наблюдается при  $h/R > 0,1$ , когда в зоне контакта отсутствует смазочный материал. При наличии идеального смазочного материала  $h/R > 0,3$ . Переход к микрорезанию характеризует фактически переход от внешнего трения к внутреннему.

# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

- Коэффициент трения является функцией ряда факторов, определяющих условия работы пары трения: нагрузки, скорости скольжения, наличия пленок на поверхностях трения контактирующих тел, микрогеометрии поверхностей этих тел, условий теплоотвода и т. п.

# Нормальная нагрузка



- **Общий вид зависимости коэффициента трения от нагрузки**

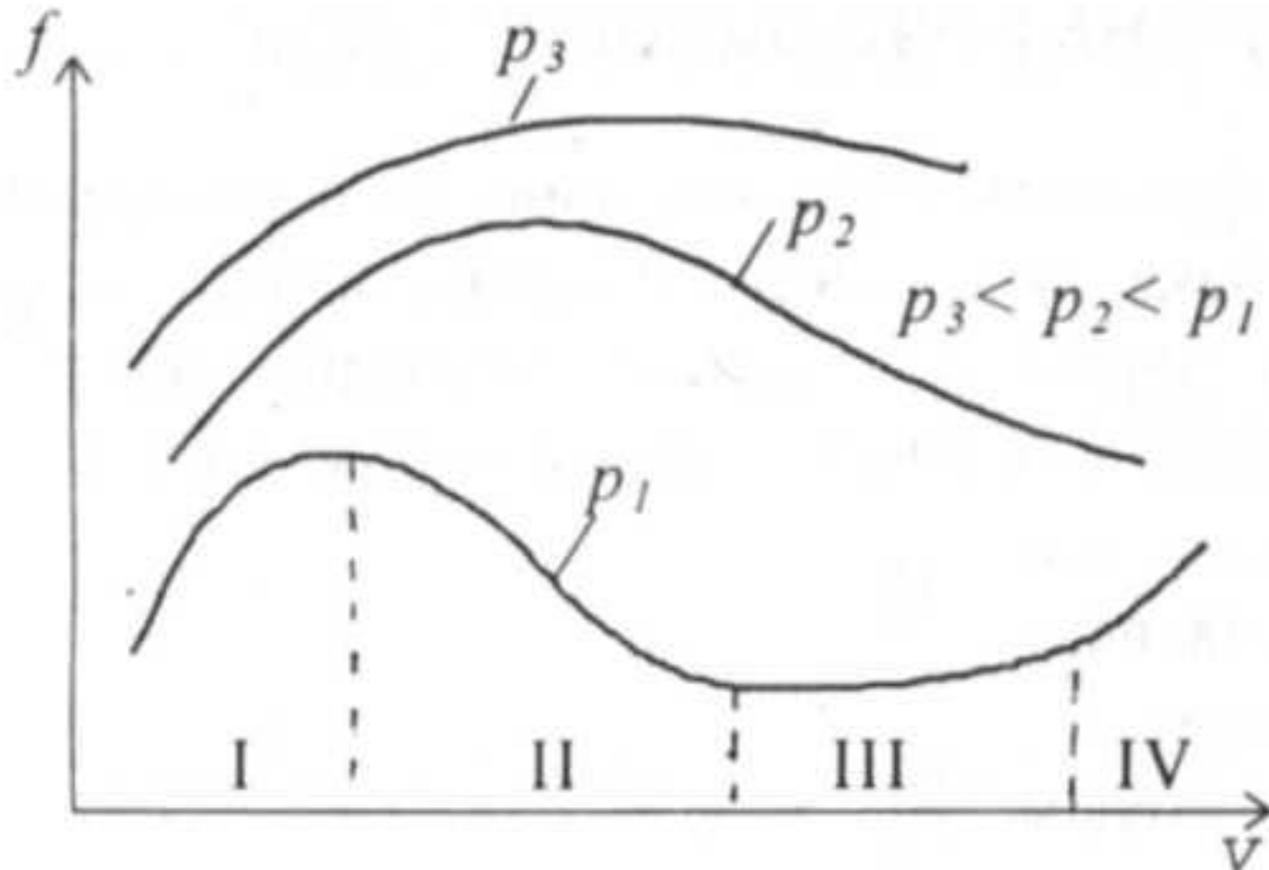
- Влияние нагрузки  $N$  на коэффициент трения зависит от вида контактного взаимодействия - упругого или пластического. В общем случае зависимость  $f(N)$  немонотонна (рис.). Положение минимума этой кривой зависит от соотношения молекулярной и механической составляющих. Положение минимума этой кривой зависит от соотношения молекулярной и механической составляющих. При увеличении отношения  $f_a/f_d$  минимум кривой смещается в область меньших значений  $N$ .

- В области малых нагрузок (левая ветвь кривой) реализуется преимущественно упругий контакт и значение  $f$  определяется в основном молекулярной составляющей коэффициента трения. Уменьшение коэффициента трения с ростом  $N$  обусловлено тем, что  $N$  растет быстрее, чем вызываемое этим ростом увеличение площади фактического контакта, и как следствие - силы трения. Другими словами, увеличение нагрузки в три раза влечет за собой рост числа фрикционных связей и их размеров, а следовательно, и рост суммарного сопротивления сдвигу в меньшее число раз.

# Скорость скольжения

- Влияние скорости скольжения  $v$  на коэффициент трения зависит от ряда факторов в том числе от нагрузки и механических свойств трущихся тел. В общем случае зависимость  $f(v)$  имеет два экстремума: максимум и минимум (рис.). Такой вид кривой характерен для несовершенного упругого контакта.

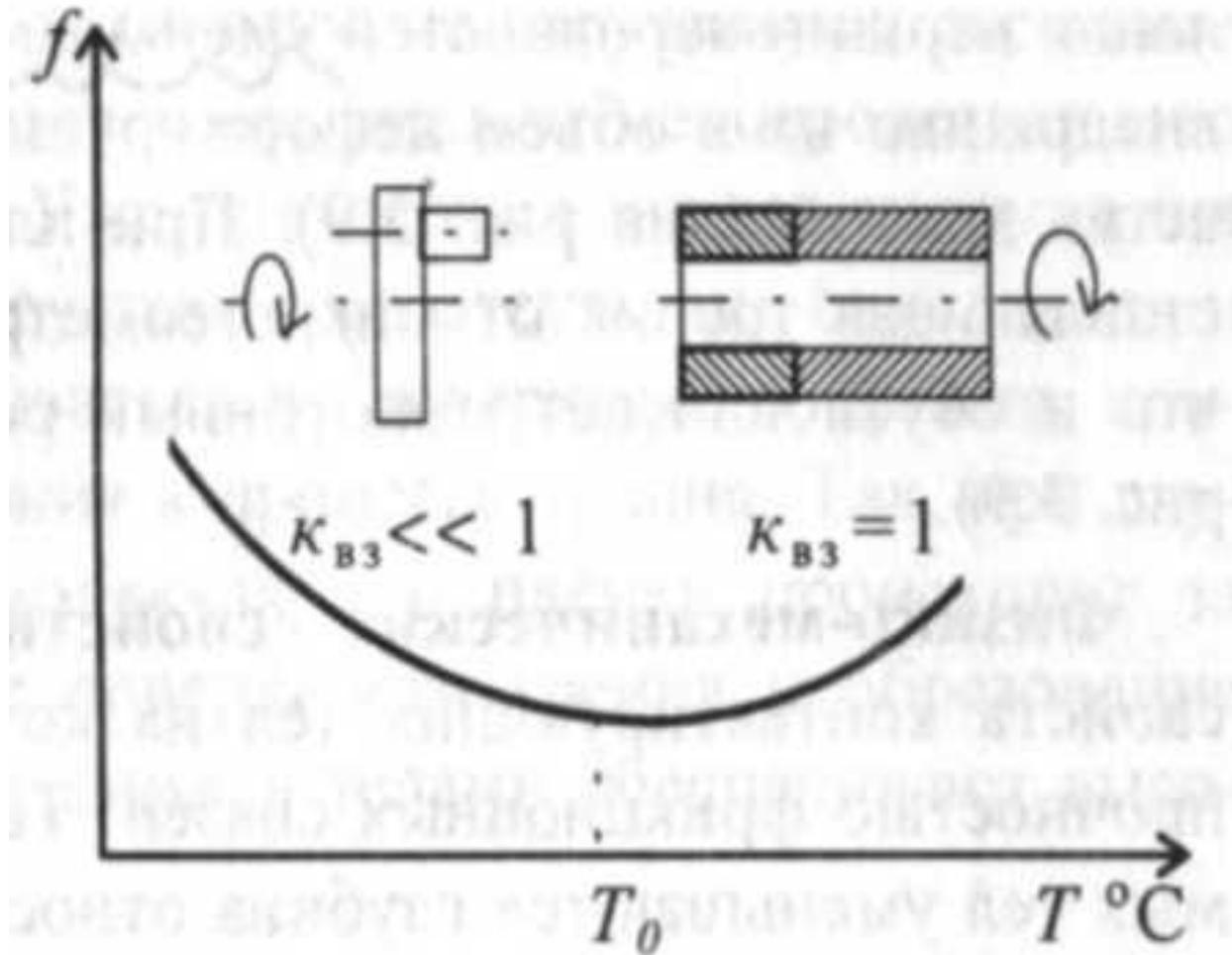
# Влияние скорости скольжения на коэффициент трения при различном контактном давлении



# Температура в зоне контакта трущихся тел

- Зависимость коэффициента внешнего трения от температуры  $T$  в зоне контакта трущихся тел немонотонна (рис.). Это обусловлено суммарным эффектом изменения молекулярной и механической составляющих коэффициента трения

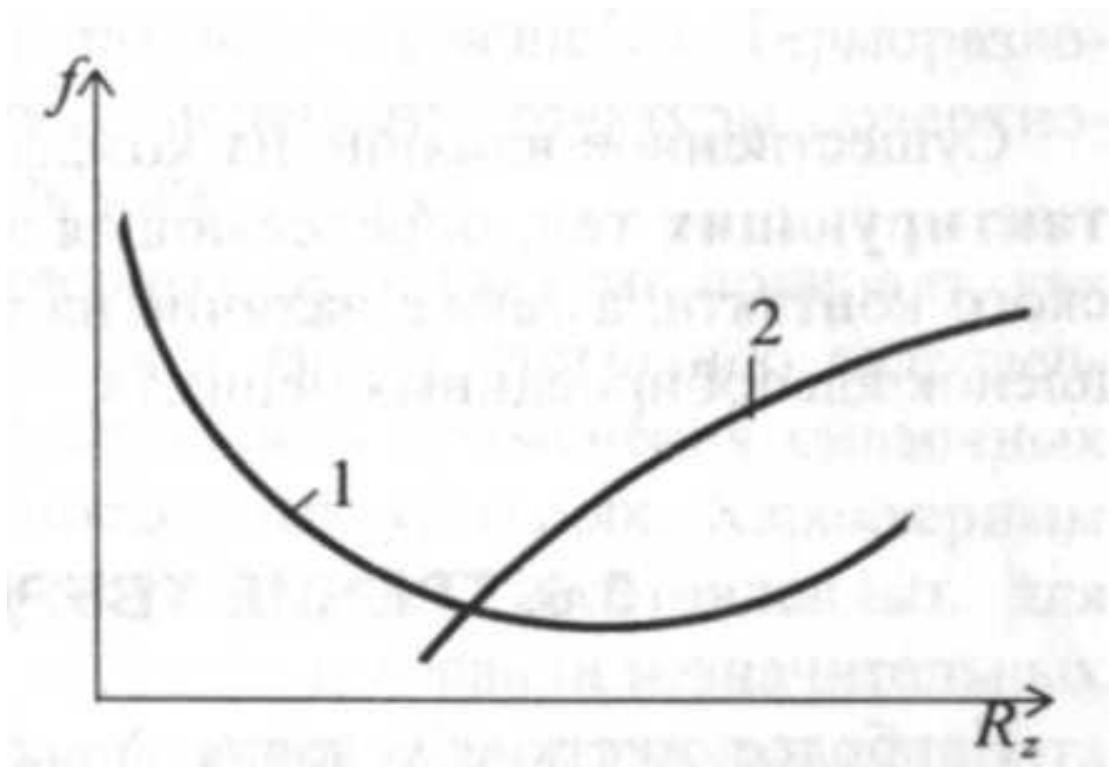
# Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне фрикционного контакта



# Микрогеометрия поверхностей трения

- Влияние микрогеометрии на коэффициент трения зависит от того, какой вид контакта (упругий или пластический) является доминирующим. При упругом контакте зависимость  $f(R_z)$  немонотонна ( кривая 1 на рис.)
- При пластическом контакте молекулярная составляющая трения от микрогеометрии не зависит, а механическая растет, что и обуславливает монотонный рост  $f$  при увеличении  $R_z$  ( кривая 2 на рис.)

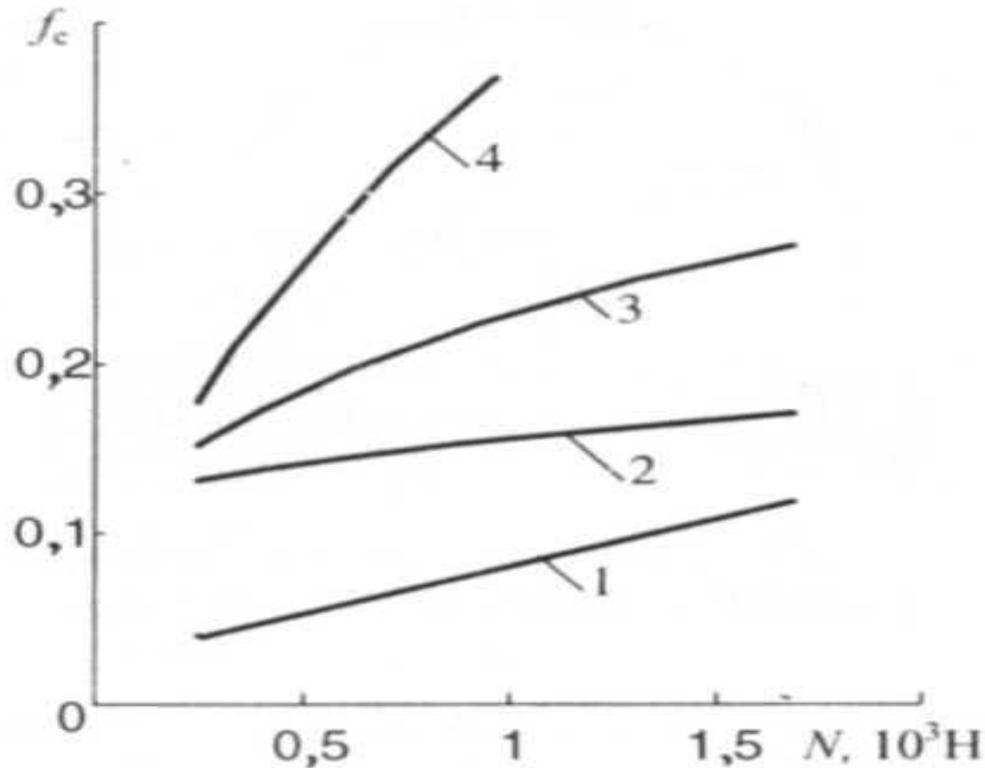
# Влияние шероховатости сопрягаемых поверхностей на коэффициент трения



# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ

- Сопротивление качению зависит от условий нагружения, механических свойств сопрягаемых тел, геометрических характеристик и параметров шероховатости поверхностей трения.

# Нормальная нагрузка.



- Влияние нормальной нагрузки на коэффициент сопротивления качению шара по плоскости (кривая 1) и желобу (кривые 2, 3, 4)

# Нормальная нагрузка

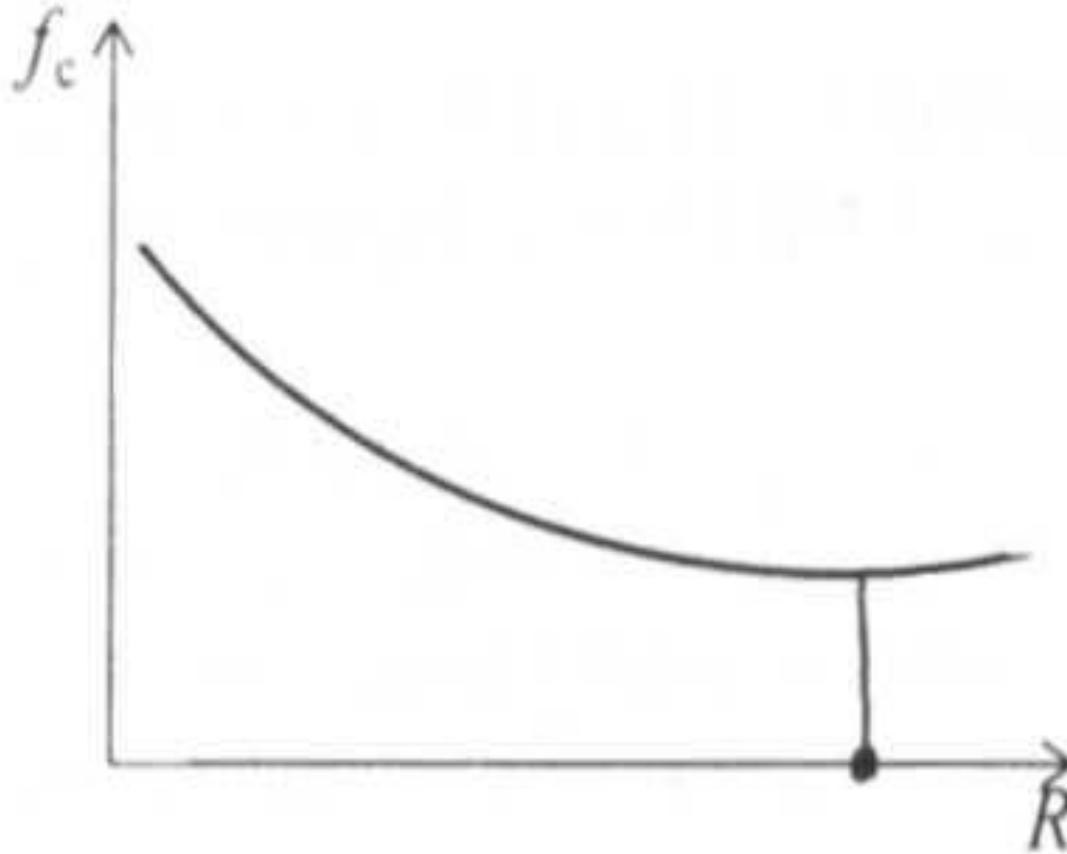
- При качении шара или цилиндра по плоскости увеличение нормальной нагрузки вызывает монотонное повышение коэффициента сопротивления качению, причем зависимость  $f_c(N)$  близка к линейной. Это обусловлено одновременным ростом всех составляющих сопротивления качению: адгезионной, так как увеличивается площадь фактического контакта и число адгезионных связей; проскальзывания вследствие роста деформаций поверхностных слоев сопрягаемых тел; гистерезисных потерь, что связано с повышением доли пластической деформации материалов трущихся тел. Описанный вид зависимости  $f_c(N)$  экспериментально подтвержден для качения металла по металлу и резине.

# Смазка

- Численное значение коэффициента сопротивления качению в значительной мере определяется наличием в зоне контакта оксидных или смазочных пленок, разделяющих сопрягаемые поверхности. При обильной смазке (кривая 2)  $f_c$  принимает при прочих равных условиях меньшие значения, чем при обедненной подаче смазочных веществ в зону трения (кривая 3). Химическая очистка поверхности (кривая 4) способствует повышению адгезионной составляющей и проскальзывания, что является причиной более высокого сопротивления качению.

- Сказанное справедливо для высоких нормальных нагрузок. При малых значениях  $N$  применение смазочного материала вызывает снижение сопротивления качению ориентировочно на 10 %. Такое едва заметное влияние смазочных веществ обусловлено тем, что снижение затрат на проскальзывание и адгезию на контакте компенсируется затратами на преодоление внутреннего трения в слое смазочного материала.

# Размеры тела качения



- **Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса катящегося тела**

# Размеры тела качения

- Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса  $R$  катящегося тела графически изображается кривой с минимумом. С увеличением  $R$  в области малых его значений сопротивление качению становится ниже. Это объясняется интенсивным снижением гистерезисных потерь, которые играют определяющую роль при малых радиусах, обеспечивающих при постоянной нагрузке большие контактные давления. С увеличением радиуса тела качения в области больших значений  $R$  несовершенство упругих свойств материалов трущихся тел менее ощутимо. Преобладающим становится влияние адгезионной составляющей, которая растет с увеличением радиуса, так как расширяется площадь контакта и число адгезионных связей.

# ТЕМПЕРАТУРА

- Вспышки температуры на пятнах контакта и разрыв мостиков сварки приводят к локальному окислению металлов. Твердые продукты окисления способствуют росту сопротивления проскальзыванию. Большие усилия затрачиваются на раздавливание частиц оксидов и подъем тела качения при накатывании его на частицы, находящиеся перед контактной площадкой. Рост средней поверхностной температуры является причиной снижения механических свойств поверхностного слоя. Это в свою очередь приводит к росту гистерезисных потерь и адгезионной составляющей. В итоге наблюдается рост коэффициента сопротивления качению.

# МИКРОТВЕРДОСТЬ

- С ростом микротвердости уменьшаются потери на проскальзывание и их деформацию, снижается глубина относительного внедрения неровностей поверхностей трения, что приводит к уменьшению площади фактического контакта и адгезионного взаимодействия контактирующих тел. В итоге повышение микротвердости вызывает падение сопротивления качению

# СКОРОСТЬ

Увеличение скорости ведет к монотонному росту коэффициента сопротивления качению. Причем эта зависимость менее существенна для качения цилиндра по цилиндру, чем шара по шару. Влияние скорости на  $f_c$  осуществляется в основном через посредство гистерезисных потерь, обусловленных ростом температуры на пятнах контакта и образованием оксидных частиц. Проскальзывание и адгезионные явления в данном случае оказывают значительно меньшее влияние на изменение сопротивлению качению.

# К факторам, определяющим сопротивление тел качению, также относятся

- Макрогеометрические отклонения поверхностей тел качения от идеальной формы тел вращения вызывают не только рост  $f_c$ , но и снижают его стабильность.
- Микрогеометрические отклонения. При переходе от шероховатой ( $Ra=3,1$  мкм) к гладкой ( $Ra=0,025$  мкм) поверхности плоского тела сопротивление качению уменьшается в 2- 3 раза.

# РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ

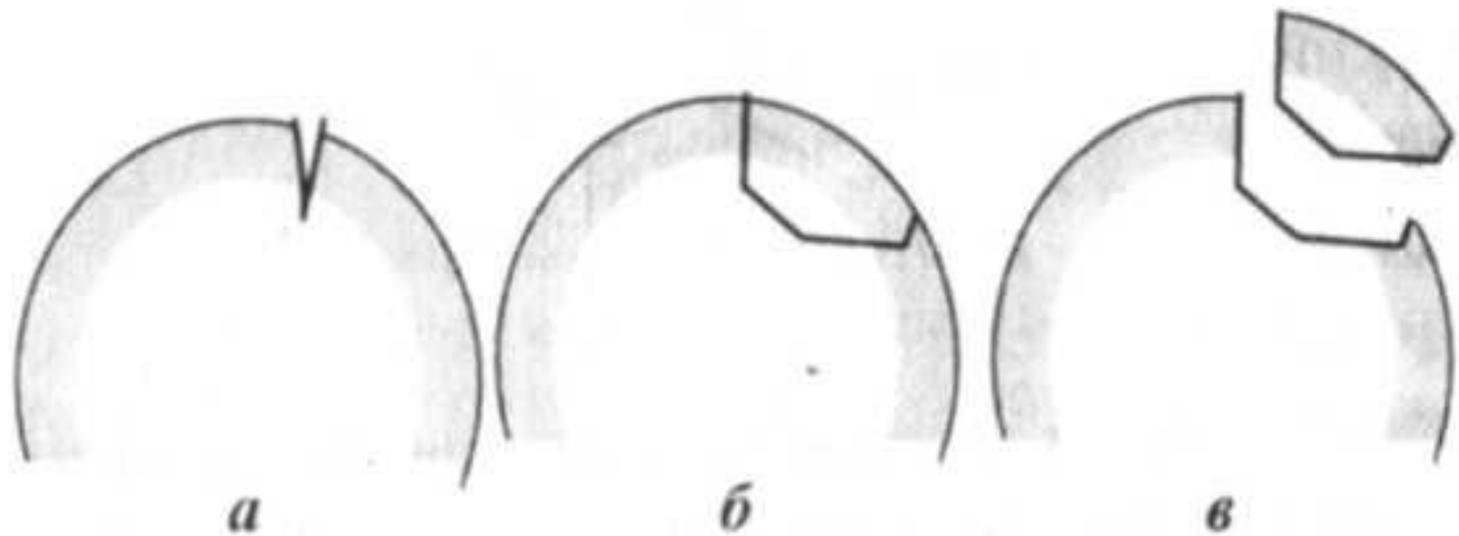
- Наиболее характерным повреждением катящихся под нагрузкой тел является усталостное разрушение (питтинг), вызванное многократными знакопеременными деформациями материала поверхностных слоев. Реже наблюдаются отслаивание, фреттинг-коррозия, коррозия, пластическое деформирование, адгезионное и абразивное изнашивание.

# Усталостное разрушение

- Проявляется этот вид разрушения в виде раковин, оспин, которые образуются вследствие развития в поверхностном слое трещин, приводящих к выкрошиванию материала. При круговой площадке касания (контакт двух сфер или сферы с плоскостью) трещины имеют дуговую форму и располагаются на поверхности concentрично



# Усталостное разрушение поверхностного слоя тела качения



# Существует две области зарождения трещин:

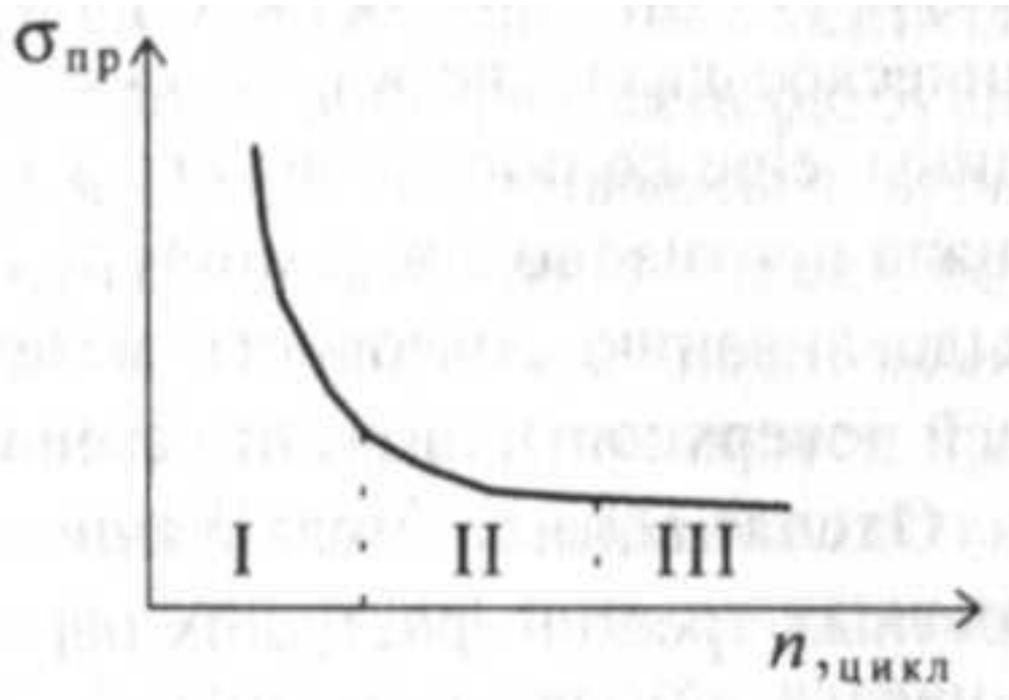
- на поверхности (в связи с концентрацией напряжений на поверхностях неровностей) и в подповерхностном слое на глубине залегания максимальных касательных напряжений. Независимо от координаты зарождения трещина (на поверхности или на глубине  $z < b$ ) распространяется под углом к поверхности трения (рис. а). При повторных нагружениях она поворачивается и выходит на поверхность (рис. б), отделяя от основного материала небольшой его объем (рис. в). Это приводит к образованию на поверхности трения кратерообразных углублений.

# **Кинетика развития процесса усталостного разрушения (трещин усталости) включает четыре стадии:**

- Первая - инкубационная стадия - характеризует период накопления искажений кристаллической решетки в отдельных микрообъемах. Поскольку металлы состоят из зерен, кристаллографические плоскости которых ориентированы случайным образом, то дефекты концентрируются в основном в невыгодно ориентированных относительно направления действия приложенных сил, а потому и перенапряженных кристаллических зернах. Однако наиболее вероятной областью скопления дефектов являются границы этих зерен.

- На второй стадии наблюдается микроскольжение (пластический сдвиг). При многократном нагружении происходит циклический знакопеременный сдвиг на плоскостях скольжения, приводящий к образованию ослабленного слоя. В результате этого образуются полосы скольжения, в которых зарождаются поры и субмикротрещины.
- Третья стадия - это рост трещин до критических размеров вследствие концентрации напряжений в их вершинах либо разупрочнения материала в окрестностях этих вершин за счет повышения концентрации дефектов.
- Четвертая стадия - выкрошивание материала, обусловленное развитием одной или нескольких сливающихся трещин.

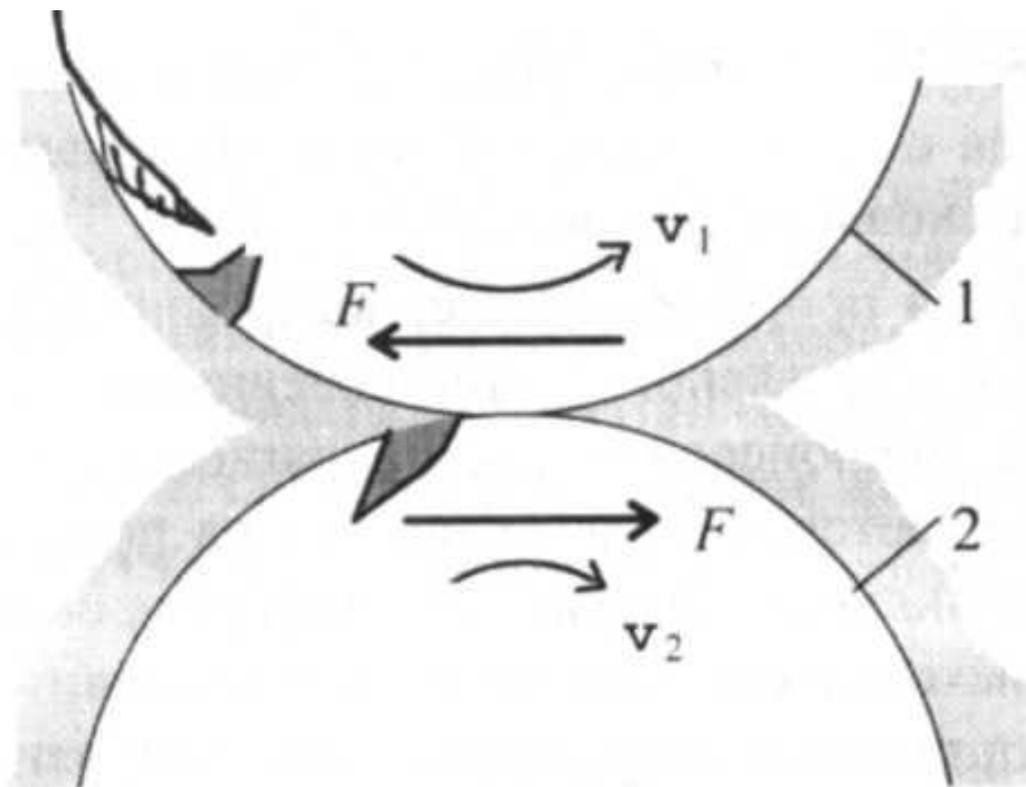
# Кривая усталости металла при качении



- На кривой можно выделить три участка: I - малоцикловой усталости; II - ограниченного предела выносливости в упругой области; III - предела выносливости (кривая параллельна оси  $N$ ).

- Малоцикловая усталость тел качения наблюдается при напряжениях, достаточных для развития в зоне контакта преимущественно пластических деформаций. Второй участок кривой характеризует сопротивление тел качения разрушению в условиях, когда контактные деформации являются в основном упругими. При упругом деформировании (участок кривой III) усталостное разрушение практически не наблюдается, а число циклов  $n$  превышает  $10^7$ . Для ряда материалов (пластмассы, некоторые сплавы) предела выносливости не существует.

# Схема усталостного разрушения тел при качении с проскальзыванием



- Скорость усталостного разрушения зависит от соотношения скоростей контактирующих тел. Пусть скорость второго тела ниже скорости первого, т. е. поверхность 2 отстающая, а поверхность опережающая (рис.). На опережающей поверхности сила трения направлена против вектора  $v$ , а на отстающей совпадает с  $v$ . При вращении трещина во втором теле под действием силы трения раскрывается, и в ее объем с большой скоростью поступает смазочный материал (втягивается телом 1). Он создает распирающее действие, близкое к ударному. В зоне контакта трещина закрывается сверху телом 1 и давление жидкости на стенки возрастает. Это способствует увеличению ее размеров.

- На опережающей поверхности 1 гидродинамическое давление в слое смазочного материала выдавливает масло из трещины еще до попадания его в зону контакта. Сила трения и смещение материала противоположно вектору скорости способствуют закрытию трещины и выдавливанию смазочного материала из ее объема. Поэтому на опережающей поверхности питтинг развивается медленнее, чем на отстающей.

# Отслаивание

- Отслаивание возникает в результате развития подповерхностных трещин, растущих параллельно поверхности трения. В отделимом такой трещиной от основного материала поверхностном слое после многократного нагружения могут образовываться трещины, плоскость которых перпендикулярна к поверхности трения. При их слиянии с подповерхностной трещиной образуется частица износа. Последняя - результат выхода подповерхностной трещины на поверхность. Одной из причин искривления траектории роста трещины могут быть встречающиеся на ее пути дефекты структуры, поры, включения. Образующиеся при таком виде разрушения частицы износа имеют пластинчатую форму, толщина их в десятки раз меньше других линейных размеров.

- Чаще всего этот вид разрушения наблюдается при качении тел, поверхностный слой которых упрочнен азотированием, цианированием, цементацией или закалкой ТВЧ. Если касательные напряжения достигают максимума на границе этого слоя с основным материалом, то происходит интенсивное отслаивание. Скорость такого процесса растет с увеличением касательных напряжений, вызванных контактной нагрузкой. Существенную роль оказывают остаточные напряжения на границе поверхностного упрочненного и подповерхностного неупрочненного слоев. При толщине слоя, значительно превышающей глубину расположения  $\tau_{\max}$ , отслаивание не наблюдается.

- Отслаивание материала и образование частиц износа пластинчатой формы может происходить также и вследствие пластического оттеснения материала одного тела неровностью другого или пластического смятия вступающих в контакт неровностей поверхностей тел качения. Пластически деформируемый материал неровности выдавливается в окрестности пятна контакта и, раскатываясь, наносится на соседние, уже покрытые оксидной пленкой участки поверхности. Оксидная пленка предохраняет основной металл от прочного сцепления с перенесенным. Поэтому при последующих циклах нагружения перенесенный металл легко отделяется в виде пластинок. По форме они подобны, а по размерам уступают частицам, образующимся по вышеописанному механизму изнашивания отслаиванием.

# Фреттинг-коррозия

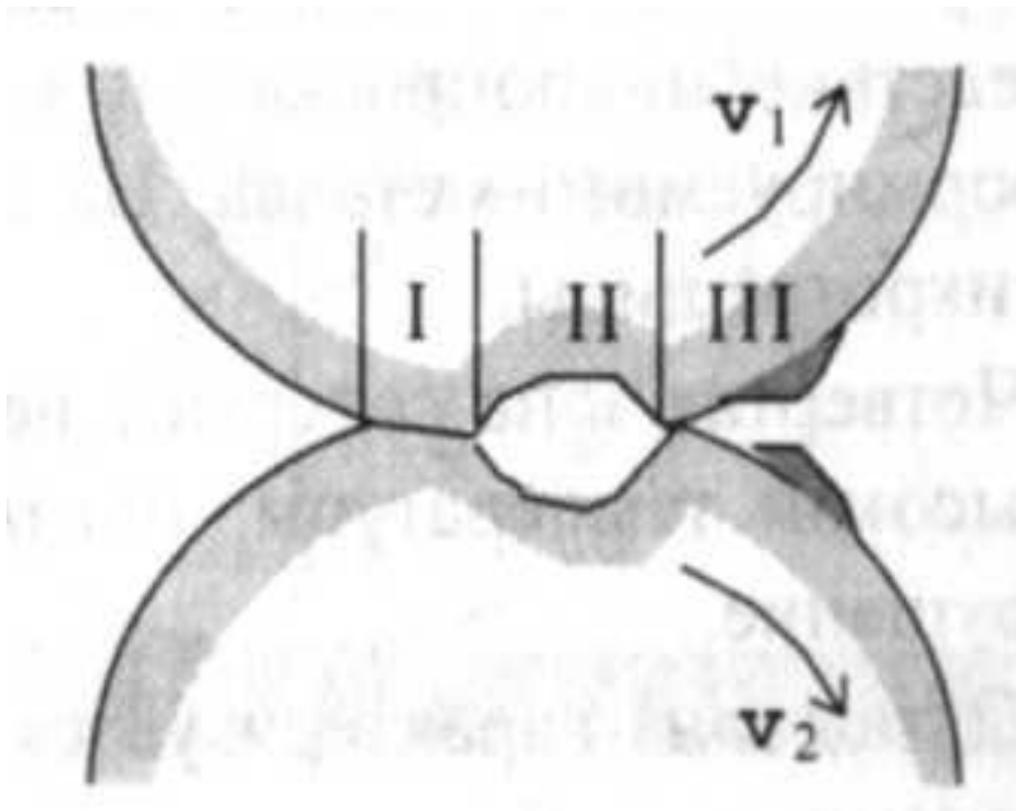
- Под действием напряжений и локальных температур кристаллическая решетка поверхностного слоя в зоне контакта разрушается. Образуются частицы металла, размеры которых сопоставимы с атомными. Эти частицы быстро окисляются, появляются оксидные пленки островкового характера, которые разрушаются под действием циклических нагрузок. На месте пленки образуются каверны, которые заполняются продуктами окисления и увеличиваются в размерах.

- . В дальнейшем вследствие окисления каверны растут, сливаясь в одну, и становятся потенциальными очагами усталостного разрушения. В объеме каверн повышаются давление оксидных частиц (оксиды занимают больший объем) и температура, что приводит зачастую к образованию трещин. Рост и слияние трещин способствуют откалыванию частиц металла. Оксидные частицы оказывают также абразивное действие. При фреттинг-коррозии возможно образование белого поверхностного слоя металла в результате диффузии азота или углерода из продуктов разложения масла. Скорость изнашивания растет с увеличением давления, амплитуды смещения (проскальзывания) и частоты нагружения.

# Коррозия

- При периодическом раскрытии стыка катящихся тел различные участки зоны проскальзывания по-разному омываются воздухом или смазочным материалом. С увеличением частоты нагружения и глубины клиновидного стыка это различие возрастает.

# Коррозионное изнашивание поверхностей тел качения



- Согласно электрохимической теории коррозионных явлений, плохо аэрируемые участки (участок II на рис.) поверхности становятся анодами, а обильно аэрируемые (участки I, III) - катодами.

- Возникающие между ними микротоки "растворяют" участки-аноды, т. е. глубинные участки раскрывающегося клина между контактирующими поверхностями. Происходит перенос положительно заряженных ионов металла с участка I на поверхность участка III. Это приводит к разрушению поверхностного слоя. Вследствие перехода ионов металла с анода на катод в зоне контакта (участок II) образуются углубления, а за ее пределами - в зоне выхода тел качения из контакта - наросты из перенесенного материала.

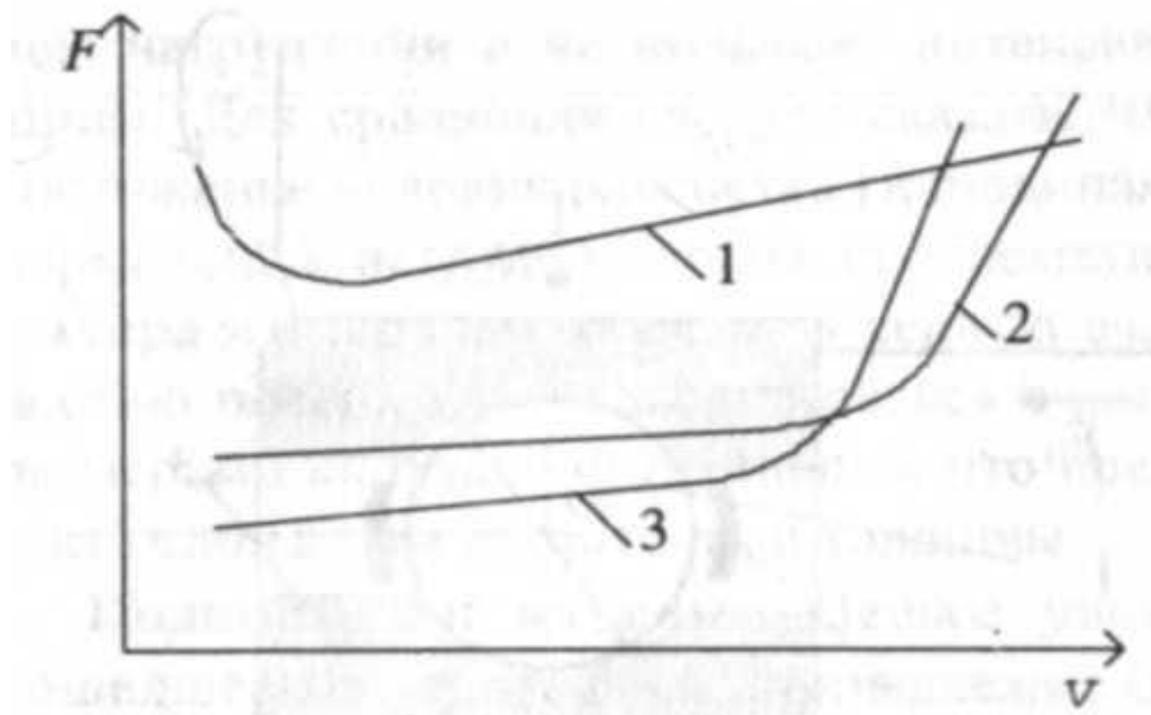
- Описанный процесс протекает кратковременно (составляет доли микросекунды). Время его протекания на фиксированном участке поверхности трения определяется временем нахождения этого участка в зоне контакта. При повороте контактирующих тел коррозионно активные участки перемещаются вдоль их поверхности. Другими словами, в процессе качения происходит непрерывный последовательный перенос ионов металла в направлении качения.

- Первая зона (центральный участок контакта) является менее поврежденной. Она имеет следы пластического деформирования неровностей и тонкого поверхностного слоя. Эта зона может быть источником частиц износа пластинчатой формы, образующихся вследствие пластического деформирования выступов поверхности.
- Вторая зона является границей между центральной зоной (постоянного сцепления) и зоной проскальзывания. Характеризуется наличием глубоких коррозионных повреждений поверхностного слоя, подвержена воздействию высоких локальных температур.

- Третья зона (проскальзывания) имеет следы коррозии, но они удаляются вследствие микропроскальзывания и "затекания" в углубления пластически деформируемого металла. На отдельных микроучастках имеют место ультрамикротрещины.
- Четвертая зона содержит незначительные следы коррозии и воздействия невысокой температуры, однако преимущественным является усталостное разрушение.
- Пятая зона характеризуется большими растягивающими и касательными напряжениями. Это зона прогрессирующего усталостного разрушения. Она содержит кольцевые или дуговые трещины, расположенные по контуру пятна касания.

- Шариковые подшипники имеют весьма малую суммарную площадь контакта тел качения с беговой дорожкой колец. Поэтому их применение оправдано только при умеренных радиальных нагрузках. При превышении допустимой нагрузки возможно возникновение вмятин на поверхностях трения беговых колец, макрогеометрических отклонений формы тел качения и, как следствие, интенсивное изнашивание. Поэтому при больших нагрузках более целесообразно применять роликовые подшипники качения, имеющие большую площадь контакта тел качения с кольцом. При предельно высоких нагрузках применим только подшипник скольжения, так как весьма ощутимым становится основной недостаток роликовых подшипников - неравномерность распределения давлений вдоль полосок контакта, возникающая при прогибе вала или перекосах при монтаже.

# Влияние скорости вращения вала на силу трения в подшипнике



- 1 - подшипник скольжения;
- 2 - роликовый подшипник качения;
- 3 - шариковый подшипник качения

- Существенное влияние на трение в подшипниках различного типа оказывает скорость вращения вала (рис.). Видно, что при умеренных скоростях и эксплуатации машин в режиме частых пусков и остановок, а также при реверсивном движении вала более целесообразно применение шарикового или роликового подшипников качения, чем эквивалентного им подшипника скольжения. Однако при высоких скоростях сопротивление качению увеличивается, катастрофически возрастая при некотором критическом значении. Это, по-видимому, связано с фрикционным нагревом трущихся тел, расширением и заклиниванием. Рост скорости практически не изменяет сопротивление скольжению подшипника, работающего в режиме гидродинамической смазки.