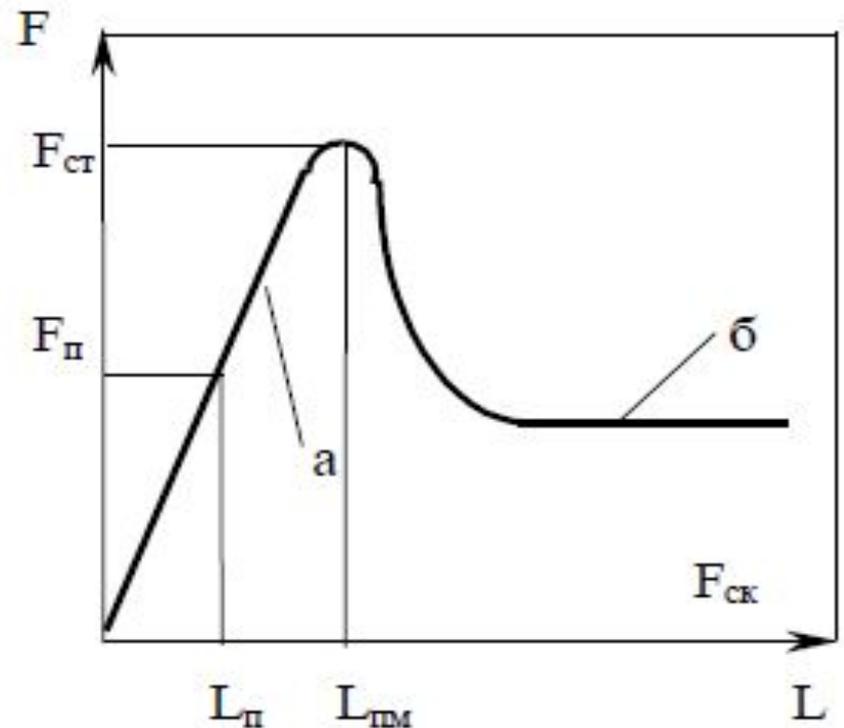


Трение скольжения

Под трением понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому. При этом различают трение покоя, скольжения и качения. Силой трения покоя (F_n) называют сдвигающее усилие, прикладываемое к контактирующим телам, и не вызывающее их взаимного скольжения (а). При этом взаимное перемещение (L_n) достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется предварительным смещением. Оно носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия.

Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым. На рисунке показана предельная величина предварительного смещения ($L_{пм}$) и соответственно предельное значение силы трения покоя, которое называют статической силой трения. При дальнейшем увеличении перемещения начинается скольжение (б).



Силу трения можно представить в виде произведения удельной силы трения (τ) и фактической площади контакта (A_r).

Под коэффициентом трения понимают отношение силы трения (F) к действующему на контакте нормальному усилию (N).

$$F = \tau A_r.$$

$$\mu = F/N.$$

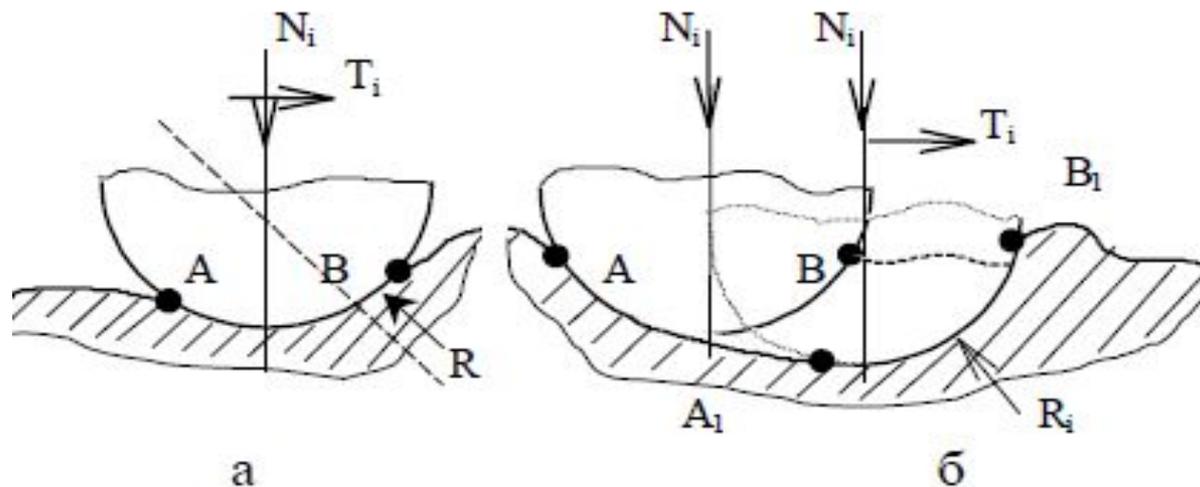
Здесь также различают коэффициенты трения покоя (статический) и скольжения (кинетический). В зависимости от характера смазочной прослойки различают 4 вида трения: сухое, граничное, гидродинамическое (жидкостное) и смешанное (одновременно имеются элементы сухого, граничного и гидродинамического трения). В первом случае контактируют несмазываемые поверхности, покрытые окисными пленками и тончайшими слоями молекул газов и воды, адсорбированными из окружающей среды. Во втором случае, помимо перечисленных пленок, присутствуют молекулы смазочных материалов в виде тонкого слоя толщиной в несколько молекул, которые прочно связаны с поверхностью. В третьем случае слой жидкой смазки полностью разделяет сопряженные поверхности.

Сухое и граничное трения сходны по своей природе и имеют общие закономерности. Причиной служит то обстоятельство, что при граничном трении мономолекулярные слои смазки прочно связаны с твердой поверхностью, обладают твердообразными свойствами и как бы служат продолжением твердой фазы. Поэтому, как и при сухом трении, фактически имеет место контакт двух твердых поверхностей. Отличие проявляется в разных значениях коэффициента трения. Если при сухом трении он обычно больше 0,2, то при граничном его величина заключена в интервале 0,05-0,2.

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения, в разработку которой внесли большой вклад российские ученые (Б.В. Дерягин, И.В. Крагельский) и зарубежные (Боуден, Тейбор). В соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих:

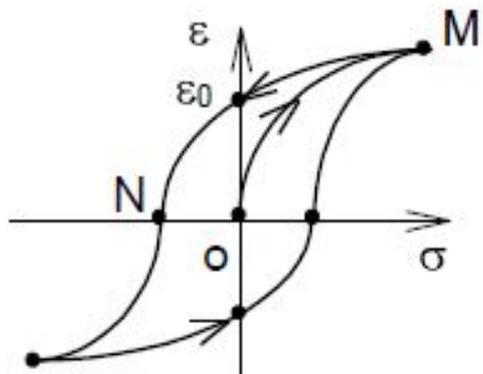
$$(1) \quad F = F_A + F_{\Delta} .$$

Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами. Рассеяние работы трения в теплоту связано с упругой деформацией кристаллических решеток. Работа внешней силы переходит в потенциальную энергию решеток. После разрыва связи потенциальная энергия переходит в энергию колебаний атомов - во внутреннюю. Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому отеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контрповерхности.



Упругое (а) и пластическое (б) отеснение материала при скольжении

На рис.4а показано скольжение жесткого сферического выступа по вязкоупругому полупространству. Материал после прохода выступа из-за запаздывания деформации по отношению к нагрузке не успевает восстанавливать форму. Поэтому выступы перед индентором и после несимметричны, а реакция опоры, приложенная в центре контактной поверхности, не совпадает по направлению с нормальным усилием. Это явление характеризуется гистерезисом деформации. На рис. 5 приведена кривая гистерезиса при растяжении-сжатии вязкоупругого стержня. Кривая OM отражает процесс нагружения, а кривая MN - процесс разгрузки. Из-за запаздывания деформации в тот момент, когда напряжение равно нулю, деформация не исчезает и равна ϵ_0 . Поэтому след, оставшийся при движении выступа, не успевает восстанавливаться полностью, чего следовало бы ожидать для идеальной упругой среды.



● На рис. 5б показано поведение жесткого выступа при скольжении по пластической среде. В начале, пока скольжение отсутствует, под действием нормального усилия выступ заглубляется. Контактная кривая АВ симметрична. При скольжении задняя граница выступа отрывается от лунки. Вся нагрузка сосредотачивается на передней границе, а дуга контакта занимает положение А1В1. Впереди возникает валик оттесняемого материала. Реакция опоры не совпадает по направлению с нормальным усилием. Поскольку молекулярное и механическое взаимодействие осуществляется на ФПК, то сила трения выраженная формулой (1) записывается в виде:

$$(2) \quad \tau = \frac{F}{A_r} = \tau_A + \tau_{\Delta},$$

где τ_A , τ_{Δ} - адгезионная и деформационная составляющие удельного усилия.

Многочисленные попытки вывести расчетное соотношение для адгезионной составляющей (τ_A) не увенчались успехом из-за невозможности учесть влияние пленок вторичных структур, покрывающих поверхности.

● Работы Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Н.М. Михина показали, что зависимость адгезионной составляющей удельной силы трения от фактического давления ($\sigma_r = N/A_r$) выражается в виде двучленного закона:

$$(3) \quad \tau_A = \tau_0 + \beta \sigma_r,$$

где τ_0 и β - молекулярные константы трения, определяемые экспериментально.

Для определения этих констант Н.М. Михиным и К.С. Ляпиным был разработан специальный прибор – тангензиометр. Из формулы (1) видно, что адгезионную составляющую силы трения можно представить в виде:

$$(4) \quad F_A = \tau_A A_r = \tau_0 A_r + \beta \sigma_r A_r = \tau_0 A_r + \beta N.$$

Адгезионная составляющая коэффициента трения

$$(5) \quad \mu_A = \frac{F_A}{N} = \tau_0 A_r / N + \beta.$$

Если деформация выступов упругая, то, подставляя выражение ФПК из формулы (2-6) в формулу (5), получаем:

$$(6) \quad \mu_A = \frac{\tau_0 B}{\frac{1}{N^{2\nu+1}}} + \beta.$$

С повышением нормального усилия коэффициент трения убывает.

Для пластического контакта, используя формулу (2-4) получаем:

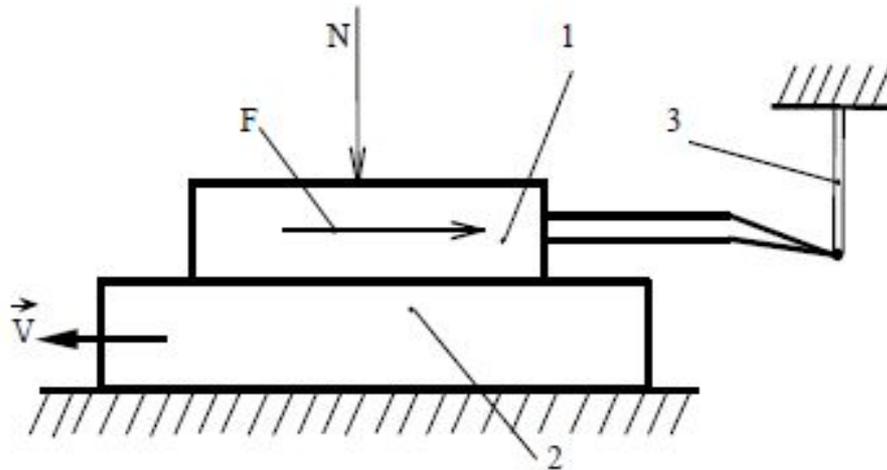
$$(7) \quad \mu_A = \frac{\tau_0}{HB} + \beta = \text{const}$$

Коэффициент трения не зависит от нагрузки.

Схема трибометра

Для измерения силы трения применяют трибометры. На них изучают трение образцов в виде дисков, контактирующих торцами, цилиндров, контактирующих по образующей, и т.д. Наиболее простым и часто используемым является трибометр, схема которого изображена на рисунке.

Образец 1 прикрепляется к пружинному динамометру 3 и прижимается к контртелу 2, приводимому в движение. Динамометр измеряет силу трения. Прибор позволяет исследовать влияние на трение шероховатости поверхностей, материалов пары трения, нормальной нагрузки, скорости скольжения, температуры, смазки и многих других факторов.



Влияние скорости скольжения и температуры на свойства контакта и фрикционные колебания

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения V в виде экспоненциальной функции предложили И.В. Крагельский и В.С. Щедров:

$$(8) \quad f = a + b V e^{-cV} + d$$

Параметры a , b , c , d характеризуют режим скольжения и свойства материалов пары трения. Параметр a зависит от физических свойств материалов и шероховатости, b и c зависят от вязкости и нагрузки, d зависит от конструкции узла трения и режима скольжения. Однако влияние скорости на свойства контакта при небольшом ее изменении само по себе невелико.

Но существенный рост скорости приводит к значительному повышению температуры контакта, поскольку мощность трения ($F \cdot V$) превращается в теплоту. Рост температуры в свою очередь вызывает заметное изменение свойств материалов в зоне контакта, резко снижается твердость. Поскольку увеличивается ФПК, снижается интенсивность молекулярного взаимодействия, происходят химические превращения в поверхностных слоях. При очень больших скоростях скольжения возможно оплавление поверхности, и сухое трение переходит в гидродинамическое. В общем случае наблюдается снижение коэффициента трения с ростом температуры.

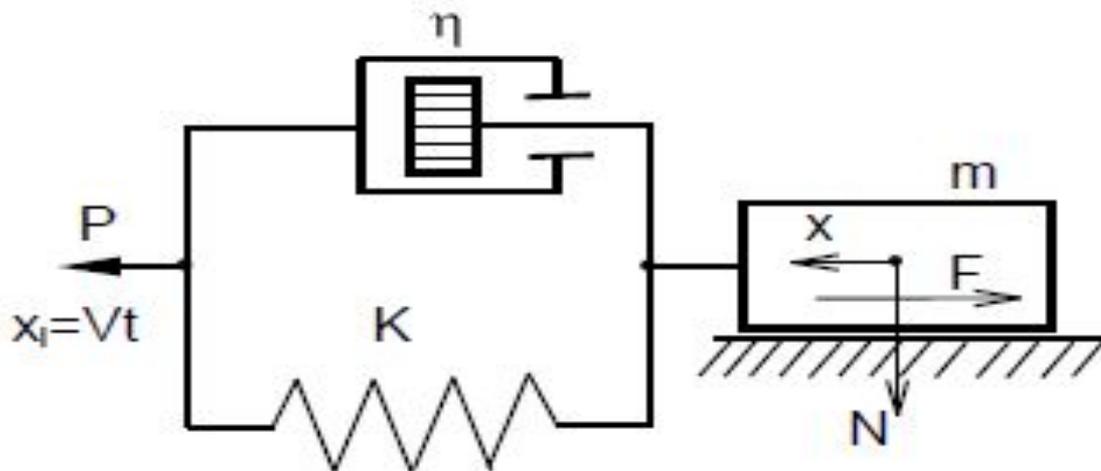
Фрикционные колебания

● При работе разных механизмов часто возникают колебания, связанные с трением. Они приводят к появлению скрипов, которые проявляются при движении (скрип колес, тормозов, протекторов автомобилей, когда машина идет юзом и др.). Такие колебания называют фрикционными. Причинами колебаний являются реологические свойства контакта (связанные с течением и деформацией), а также упругие свойства элементов пары трения и их связей с другими деталями. Главным проявлением реологии контакта является рост ФПК, а следовательно, и статической силы трения с увеличением времени неподвижного контакта, и скачкообразное падение силы трения при переходе от покоя к движению, а затем падение силы трения с ростом скорости скольжения, вызванное, главным образом, скачком температуры на пятнах контакта.

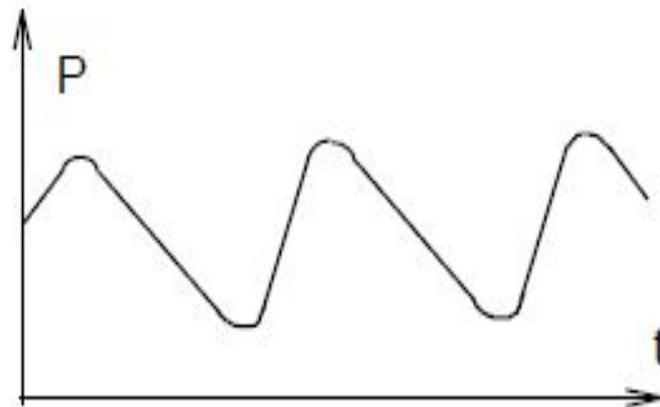
Динамическая модель такой системы представляет собой последовательно соединенные тела Кельвина - Фойгта и Сен - Венана. Если в целях упрощения принять, что $\eta=0$, $\mu=\text{const}$, то 2-й закон Ньютона для колебаний ползуна запишется в виде:

$$m\ddot{x} = -kx - V\dot{x} + \mu N \operatorname{sign}x = 0$$

Динамическая модель фрикционной системы



Решение этого уравнения позволяет найти законы движения ползуна и колебаний тягового усилия. Показан примерный график колебаний тягового усилия. В зависимости от уровня гашения (вязкости системы μ) колебания могут существовать либо не возникать. От этого зависит устойчивость, надежность и долговечность механических систем, что необходимо учитывать при проектировании и техобслуживании.



Список литературы

- Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Камбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
- Крагельский И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В.Крагельский, Н.М.Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
- Дроздов Ю.Н. и др. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – Машиностроение, 1986 – 224с.
- Справочник по триботехнике: в 3т. / под общ. ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
- Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безысность): Учебник/ Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во «МСХА», 2001. – 616 с.
- Современная трибология: итоги и перспективы / под. ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008 г. – 480 с.
- Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка — М : Машиностроение, 2003. — 576 с.