**ПРИРОДА И ВИДЫ ТРЕНИЯ.**

**Классификация видов трения.**

Под *трением* понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому.

По отношению к телам различают*:*

– *внутреннее трение* – характеризует взаимодействие, происходящее в объеме одного объекта (твердого тела, жидкости, газа, сыпучего тела). Взаимодействие осуществляется по всей геометрической поверхности выделенных слоев, движущихся между собой со скоростью, изменяющейся плавно и непрерывно.

– *внешнее трение* – взаимодействие осуществляется в общем случае между различными по строению твердыми телами и имеет двойственную атомно-молекулярную и механическую природу.

Двойственность природы внешнего трения обусловлена рассеиванием энергии при преодолении сил молекулярного взаимодействия в зонах фактического контакта и затратами энергии на преодоление механического сопротивления, связанного с формоизменением трущихся поверхностей. Реализуется в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта, скорость скольжения в которых изменяется скачком.

По кинематическому признаку различают*:*

– *трение покоя* – это сопротивление контактирующих тел их относительному перемещению. Приложенные нормальные и касательные нагрузки не вызывают взаимного перемещения и разрушения пятен фактического контакта, т.е. вершины контактирующих выступов не смещаются. (рис. , а). Трение покоя реализуется в муфтах сцепления, ременных передачах, фрикционных устройствах и т.п.

*v=0*

*v1*

*v2*

*1*

*2*

*1*

*2*

*v1*

*v2*

*1*

*2*

*v3*

*v4*

*а*

*б*

*в*

*1*

*2*

*ω*

*г*

*Fn*

Рис. Виды внешнего трения: *1* – перемещающееся тело, *2* – неподвижное тело

*а* – покоя; *б* – скольжения; *в* – качения; *г* – верчения

– *трение скольжения* наблюдается при относительном перемещении контактирующих тел и сопровождается постоянной сменой выступов поверхностей трения, вступающих в контакт. При трении скольжения сопряженные тела перемещаются поступательно и относительные скорости различных точек перемещающегося тела одинаковы (рис. , б). Реализуется в парах вал – вкладыш, поршень – втулка и т.д.

– *трение качения* наблюдается, когда одно тело перекатывается по другому и при повороте одного из которых относительно мгновенного или постоянного центра в контакт вступают новые участки поверхностей трения. Относительные скорости разных точек катящегося тела различны и определяются их удалением от контактной площадки (рис. , в). Реальные тела, обладающие упругостью, контактируют не в точке, а на некоторой площадке, поэтому иногда оба вида трения (качение и скольжение) проявляются совместно (возможно проскальзывание); Встречается в подшипниках качения, парах колесо – рельс, ролик – транспортирующая лента конвейерных систем и др.

– *трение верчения* наблюдается, когда площадь обеих поверхностей трения одинаковы, а скорости относительного перемещения зависят от удаления от центра контактной площадки и находятся в интервале от 0 до vmax (рис. , г). Трение верчения присутствует в пятах вертикальных валов, гироскопах и т.д.

В зависимости от наличия смазки и характера ее поведения в трибосопряжении различают*:*

– *трение без смазочного материала* *(сухое трение)*– непосредственный контакт взаимодействующих поверхностей.

Сухое трение имеет место при отсутствии смазочного материала между трущимися поверхностями только в вакууме. Условно сухое трение при наличии адсорбированных пленок на поверхности твердого тела встречается в тормозах, фрикционных передачах и муфтах, работающих всухую, в узлах трения текстильной, пищевой и химической промышленности, где смазка во избежание порчи продукции либо по соображениям безопасности недопустима.

– *граничное трение* – поверхности трущихся тел разделены граничным слоем толщиной 0,01 – 0,1 мкм, состоящим из оксидов воды, адсорбировавшихся газов, загрязнений и смазочных веществ. Граничный слой на поверхности трения выдерживает без разрушения высокие давления и может привести к снижению трения на порядок. Граничное трение присутствует в низкоскоростных узлах трения; узлах с разовой или обедненной подачей смазочного материала в зону трения, при пусках и остановках машин.

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.

– *жидкостное трение* – трущиеся поверхности разделены слоем смазочной жидкости, находящейся под давлением, которое уравновешивает внешнюю нагрузку. Сопротивление перемещению трущихся тел определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости. Сила трения не зависит от природы сопрягаемых тел. Слой жидкой смазки полностью разделяет сопряженные поверхности

Виды жидкостного трения: *гидростатическое* – давление в смазочном слое создается извне; *гидродинамическое* – смазывающая жидкость вовлекается в зазор между трущимися поверхностями и создает подъемную силу (при высоких скоростях скольжения).

Жидкостное трение реализуется в парах трения: вал – подшипник скольжения, плунжер – втулка, цилиндр – поршень гидравлических устройств.

– *газодинамическое трение* – поверхности трения разделены слоем газа. Реализуется в высокоскоростных узлах с высокой точностью перемещения элементов пар трения, применяемых в ультрацентрифугах, турбокомпрессорах, точных приборах;

– *смешанное* трение, когда одновременно имеются элементы сухого, граничного и гидродинамического трения.

**Трение скольжения при отсутствии смазки.**

**Основные понятия**

*Сила трения* (*F*тр) – усилие необходимое для преодоления сопротивления трения. Является равнодействующей элементарных сил трения на пятнах контакта.

Силу трения можно представить в виде произведения удельной силы трения (τ) и фактической площади контакта (*Аr*):

 .

*Удельная сила трения* (*τ*) – сила трения, распределенная по номинальной площади касания *Аа* контактирующих поверхностей.

*Поверхность трения* – номинальная поверхность трения, на которой осуществляется взаимодействие твердых тел при внешнем трении.

Сила трения не является величиной постоянной (см. рис.). *Силой трения покоя* (Fп) называют сдвиговое усилие, прикладываемое к контактирующим телам, и не вызывающее их взаимного скольжения (см. рис. ,а).

*а*

*б*

*F*

*Fст*

*Fп*

*L*

*Lп*

*Lпм*

*Fск*

**Рис. . Характерные случаи формирования сил трения:**

**а - сила трения покоя; б - сила трения скольжения**

При этом взаимное перемещение (*L*п) достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется *предварительным смещением*.

*Предварительное смещение* – перемещение между твердыми телами, при котором происходит изменение силы трения. 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* (*F*ст).

При дальнейшем увеличении перемещения начинается скольжение (*F*ск).

**Коэффициент трения**

***Мерой оценки трения служит коэффициент трения*** *f*, который определяется как отношение силы сопротивления относительному перемещению двух тел при трении *F*тр, к нормальной составляющей реакции внешних сил *Fn*, действующих на поверхность тела:

 .

Но не всегда правильно задаваться значением *f* пользуясь справочниками, где не указаны режимы и условия, при которых этот коэффициент получен. Приводимые в справочниках данные коэффициента трения, если не оговариваются условия их получения, часто являются ориентировочными, ибо в зависимости от условий трения коэффициент трения одной и той же пары может изменяться в широких пределах.

|  |  |
| --- | --- |
| Вид трения | Коэффициент трения |
| Скольжения |  |
| без смазочного материала | 0,1-1,0 |
| граничное | 0,05-0,2 |
| Жидкостное | 0,002-0,01 |
| Газодинамическое | 0,0005-0,001 |
| Качения |  |
| без смазочного материала | 0,005-0,01 |
| со смазочным материалом | 0,0005-0,005 |

В настоящее время одной из наиболее развитых теорий трения является молекулярно-механическая теория трения. Ее основы были созданы в XX веке трудами ученых: Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Ф. Боудена, Д. Тейбора и др.

Существенным для понимания трения твердых тел в соответствии с молекулярно-механической теорией является то, что вследствие шероховатости и волнистости поверхностей контактирование всегда дискретно, т.е. происходит в отдельных пятнах контакта.

*Механическое взаимодействие* обусловлено взаимным внедрением отдельных точек касания. Одна поверхность внедряется в другую не только за счет имевшейся шероховатости, но и деформации, образующейся под нагрузкой вследствие анизотропии механических свойств (рис. ).

Fn

Fn1

Fn2

Fтр1

Fтр2

v

а)

Fn

v

r

Fтр. деф

pr

τмол

h

A

Fтр. мол

б)

Рис. Контакт двух шероховатых тел:

а – сила трения, возникающая при контактном взаимодействии двух неровностей; б – контакт жесткой сферы с деформированным телом; Fn – нормальная нагрузка; Fтр – сила трения; τмол – касательное напряжение среза; r и h – радиус неровности и глубина ее внедрения; Fтр. мол и Fтр. деф – молекулярная и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность

*Молекулярное взаимодействие* обусловлено взаимным притяжением поверхностей двух тел. Практически молекулярное притяжение или пренебрежимо мало, или такое, что приводит к образованию прочной связи в объеме и может быть разрушено только при сдвиге.

Суммарная величина силы трения:

 

где Δ*F*тр.мол, Δ*F* тр.деф – молекулярная (адгезионная) и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность, внедрившуюся на глубину *h* и движущуюся по деформируемому телу.

Разделив левую и правую части уравнения на нормальную нагрузку *Fn* получим выражение для коэффициента трения, который равен сумме его молекулярной и деформационной составляющих:

 .

Определим эти составляющие для случая внедрения отдельной микронеровности (см. рис., б).

**Молекулярная составляющая.** При рассмотрении этой задачи полагаем, что сдвиговое сопротивление молекулярной связи τ пропорционально времени оседлой жизни частицы *t*:

 , 1

где *a* – коэффициент пропорциональности.

Уравнение Френкеля для времени оседлой жизни частицы:

 , 2

где *t*0 = 10-12 с – постоянная времени; *u*' – энергия активации молекулярной связи; *T* – абсолютная температура; *k* – постоянная Больцмана.

В условиях трения, когда имеется касательная и нормальная нагрузка на фрикционном контакте, энергию активации можно представить как сумму:

 , 3

где *u* – энергия активации; γ – постоянная; *pr* – фактическое давление на контакте.

Тогда уравнение (1) с учетом (2) и (3) будет иметь вид:

 . 4

После разложения уравнения (4) в ряд будем иметь

 .

Введем обозначения

 , .

Тогда получим

 .

Разделим правую и левую части этого уравнения на *pr*, получим значение молекулярной составляющей коэффициента трения для отдельной неровности:

 

где τ0 – напряжение среза молекулярной связи; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений (пьезокоэффициент).

Эти параметры являются характеристиками поверхностного слоя материалов и зависят от пленок, которые покрывают поверхность контактирующих тел. Для большинства металлов и полимеров τ0 = 0,2–30 МПа, β = 0,02–0,15.

**Деформационная составляющая**. Принимаем, что площадь сечения, перпендикулярная к направлению движения неровности, будет в первом приближении равна площади вписанного треугольника *А*= *h*⋅*ak* (рис. ).

ak

r

h

Рис. . Схема контакта:

ak – радиус пятна контакта; h - глубина внедрения; r – радиус неровности в виде сферического сегмента

Если предел текучести материала плоскости σт будет соответствовать напряжению, действующему на неровность в направлении движения, то деформационная составляющая силы трения будет

 .

Нормальная нагрузка на такую неровность

 ,

где σn – нормальное напряжение (перпендикулярное к направлению движения).

Тогда при условии, что σn≈σт, получим деформационную составляющую коэффициента трения:

 

или с учетом, что радиус сегмента , получим окончательно

 ,

где *k* = 0,55⋅α – при пластическом контакте; *k* = 0,19⋅α – при упругом контакте (α – коэффициент гистерезисных потерь материала).

*Общий коэффициент трения* для единичной неровности будет иметь вид

 , 7

где τ0 – удельная сдвиговая прочность молекулярной связи; pr – давление на площади фактического контакта; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений (пьезокоэффициент); *h* – глубина внедрения неровности; *r* – радиус неровности.

Таким образом, коэффициент трения представляет собой сумму молекулярной и механической составляющих. Если материал на пятнах контакта деформируется в основном упруго, значение *f* зависит от молекулярного взаимодействия. При пластическом контакте существенную роль оказывает деформационная составляющая.

**Виды контакта при трении**

Так как фрикционный контакт неоднороден и дискретен, то сила трения для реальных тел представляет собой сумму элементарных сил трения, возникающих на отдельных площадках касания.

На практике при переходе от одного вида нагружения фрикционной связи к другому коэффициент трения обычно изменяется.

При *расчете f необходимо учитывать* вид контакта: упругий, пластический (ненасыщенный или насыщенный) или упругопластический.

*Упругий* контакт имеет место в трибосопряжениях, когда действующая нагрузка и сила молекулярного взаимодействия не приводят к возникновению в поверхностных слоях материалов деталей напряжений, превышающих предел текучести материала.

*Пластический контакт* характеризуется контактными напряжениями, превышающими предел текучести материала, что приводит к внедрению единичных неровностей в поверхность, обладающую меньшей твердостью.

По числу контактирующих неровностей различают насыщенный и ненасыщенный контакт.

*Насыщенным* называют контакт двух шероховатых поверхностей, при котором число контактирующих неровностей равно числу неровностей, расположенных на контурной площади касания. Насыщенный контакт характерен для условий скольжения шероховатой поверхности большей твердости по ровной поверхности материала, обладающей меньшей шероховатостью и меньшей твердостью.

*Ненасыщенный* контакт возникает, когда число контактирующих неровностей меньше числа неровностей, расположенных на контурной площади касания. Он возникает при трении тел, твердость которых различается незначительно. Подавляющее большинство трибосопряжений машин работают при упругопластических деформациях и в условиях пластического ненасыщенного или насыщенного контакта.

Учитывая характер фрикционного взаимодействия, И.В. Крагельский и Н.М. Михин рекомендуют для *пластического контакта* коэффициент трения определять при условии pr ≈ HB:

 .

Определить точно коэффициент трения, используя данное выражение, не представляется возможным вследствие слабой изученности процесса силового взаимодействия твердых тел при упругопластических деформациях материала в зоне контакта, что не позволяет с достаточной точностью установить величину внедрения неровностей трущихся поверхностей.

В инженерных расчетах при определении коэффициента трения деталей, работающих в условиях *пластического ненасыщенного* контакта, используют формулу:

 ,

где τn – касательные напряжения, возникающие в поверхностных слоях материала в результате молекулярного взаимодействия; *pc* – контурное давление; Δ – комплексная характеристика шероховатости поверхности:

 .

Первое слагаемое формулы характеризует молекулярную составляющую, а второе слагаемое – деформационную составляющую коэффициента трения.

Коэффициент трения деталей, работающих в условиях *насыщенного пластического контакта*:

 .

Для приближенного расчета коэффициента внешнего трения тяжелонагруженных трибосопряжений, работающих в условиях пластического контакта, может быть использовано выражение:

 ,

где ρпр – приведенный радиус кривизны поверхности; *Е*пр – приведенный модуль упругости; μ – кинематическая вязкость смазки при 50 °С; vΣ – суммарная скорость качения (vΣ = v1 + v2); vск – скорость относительного проскальзывания трущихся поверхностей.

**Факторы, влияющие на коэффициент трения.**

*Нормальная нагрузка*. В области малых нагрузок (левая часть зависимости на рис.) происходит в основном упругий контакт и значение *f* определяется в основном молекулярной составляющей коэффициента трения.

С увеличением нагрузки возрастает фактическое давление *pr* при упругом контакте и, следовательно, уменьшается молекулярная составляющая коэффициента трения (первые два слагаемых). Одновременно увеличивается внедрение *h* неровности, вследствие чего увеличивается деформационная составляющая коэффициента трения. В общем случае *f* проходит через минимум и существует некоторое оптимальное значение давления *pr* опт, соответствующее этому минимуму (рис. ).

Данная зависимость характерна *для металлов и полимеров*, однако, при чрезмерном увеличении нагрузки происходит подплавление поверхностных слоев полимера, а, следовательно, снижение сопротивления сдвигу.

f

f

fмол

fдеф

fmin

pr (Fn)

pr опт

Рис.. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

*Микрогеометрия поверхности.* Влияние микрогеометрии на коэффициент трения зависит от того, какой вид контакта (упругий или пластический) является доминирующим.

*При* *упругом контакте* (линия 1 на рис.) увеличение *Rz* приводит вначале к снижению площади фактического контакта и уменьшению молекулярной составляющей. При дальнейшем увеличении *Rz* радиусы закруглений вершин неровностей уменьшаются. Это способствует более глубокому внедрению их в объем деформируемого материала и увеличению деформационной составляющей (правая ветвь кривой 1 на рис.).

*При пластическом контакте* молекулярная составляющая трения от микрогеометрии не зависит, а деформационная растет при увеличении *Rz* (кривая 2 на рис.)

f

Rz

1

2

Рис. Зависимость коэффициента трения от параметра шероховатости поверхности

*Температура в зоне контакта*. Для *металлов* с ростом температуры снижается молекулярная составляющая вследствие уменьшения твердости материала и прочности адгезионных соединений на срез. По мере приближения к *Т*0 падение замедляется, т.к. уменьшение твердости материала приводит к росту размеров и числа пятен фактического контакта. С дальнейшим ростом температуры увеличивается вклад механической составляющей, что способствует росту коэффициента трения в целом.

f

T, °C

I

II

III

металл

полимер

T0

Рис. Зависимость коэффициента трения от температуры

Для *полимерных* материалов зависимость удельных сил трения от температуры (участок I) можно представить в виде обратной пропорциональности модулю упругости. В температурном интервале зоны III на удельные силы трения оказывают влияние вязкие свойства расплава материала, так как в зоне контакта заготовки с поверхностью инструмента происходит частичное прилипание, то происходит межслоевой сдвиг внутри образца. Переходная зона II характеризуется незначительным изменением удельных сил трения, поэтому при расчетах принимается постоянной.

*Скорость скольжения*. Температура в зоне контакта существенно зависит от скорости скольжения *v*. В общем случае зависимость коэффициента трения от скорости проходит через максимум, положение которого зависит от давления *pr* на контакте (рис.). Наличие максимума объясняется гистерезисными потерями, возникающими в деформируемом материале при трении.

С ростом *v* в области малых значений незначительно увеличивается температура на пятнах фактического контакта, что приводит к снижению твердости, а, следовательно, увеличению вязкого сопротивления деформированию.

f

v

p3

p2

p1

p3< p2< p1

Рис. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Падение *f* при дальнейшем увеличении *v* обусловлено как молекулярной, так и механической составляющей – деформации не успевают проникать на большую глубину, и носят упругий характер. С дальнейшим увеличением скорости происходит нагрев значительного слоя деформируемого материала в твердой фазе, что приводит к некоторому увеличению *f*. При интенсивном разогреве тел внешнее трение переходит к внутреннему, что приводит к росту *f*. Если материалы тел обладают высокими упругими свойствами, а изменение температуры не оказывает влияния на эти свойства, то коэффициент трения не зависит от скорости.

*Физико-механические свойства контактирующих тел.* Влияние свойств контактирующих тел на коэффициент трения связано с числом и прочностью фрикционных связей.

При увеличении твердости уменьшаются глубина относительного внедрения и число контактирующих неровностей, что приводит к уменьшению молекулярной и механической составляющих трения (кривая 1 на рис.).

В условиях упругого контакта *f* зависит от модуля упругости контактирующих тел. С увеличением модуля упругости уменьшается фактическая площадь контакта и глубина относительного внедрения неровностей, что приводит к падению коэффициента трения (кривая 2 на рис.).

f

HB, E

1

2

Рис. Зависимость коэффициента трения от свойств материала

Существенное влияние на коэффициент трения оказывает природа контактирующих тел, определяющая энергию (тип) связей на пятнах фактического контакта, а также наличие на поверхности трения оксидных пленок и пленок адсорбированных веществ.