**ТРЕНИЕ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ**

**Трение при граничной смазке** – один из видов внешнего трения, при котором трение и износ между телами, находящимися в относительном движении, определяется свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличных от объемных.

В режиме граничного трения *работают*:

– почти все содержащие смазочный материал тяжелонагруженные узлы трения в период их пуска или остановки (в период падения или подъема скорости скольжения). Это подшипники качения и скольжения, зубчатые передачи, пары трения: колесо – рельс, поршень – втулка, кулачок – толкатель;

– низкоскоростные узлы трения: направляющая – суппорт, винт – гайка;

– узлы с консистентным смазочным материалом, шарнирные устройства, волокна троса;

– пары инструмент – деталь при обкатке труб или тел качения, резания металлов, вытяжке проволоки.

Большой вклад в изучение процессов трения при граничной смазке внесли В. Гарди, Ф. Буден, Ю.В. Дерягин, А.С. Ахматов и др.

При граничной смазке поверхность сопряженных тел разделена слоем смазочного материала малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм), которая соизмерима с максимальной высотой неровностей профиля. Эта пленка прочно связана с металлической подложкой силами молекулярного взаимодействия и поэтому теряет свойства, присущие жидкости в большом объеме, где частички жидкости могут свободно перемещаться относительно друг друга; сопротивление движению жидкости определяется внутренним трением.

Наличие граничного слоя (пленки) снижает силы трения по сравнению с трением без смазки в 2–10 раз, уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

**Формирование граничных слоев.**

Граничные слои (пленки) образуются в результате *адсорбции* (осаждение на поверхности) молекул жидкой или газообразной внешней среды на поверхность твердого тела, протекающей под действием силового (электрического или магнитного) поля этого тела.

Возможна адсорбция твердых частиц (частицы графита) из коллоидной суспензии. Все масла способны адсорбироваться на металлической поверхности. Наиболее активными адсорбатами являются поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Граничные слои могут образовываться и в результате *химической реакции* смазочного материала с металлами трущихся поверхностей. Жирные кислоты, входящие в качестве присадок в масла, вступают в реакцию с металлом, образуют мыла, способные выдерживать без разрушения значительные деформации.

Благодаря подвижности граничного слоя молекул смазочного материала на поверхности трения адсорбция протекает с большой скоростью, что придает смазочной пленке свойство «самозалечиваться» в местах ее повреждения.

Молекулы смазочного материала обычно ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности, что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде ворса (рис. ).

Рис. Схема идеального граничного слоя

Формирование граничных слоев смазки происходит в следующей последовательности. Вначале на активных центрах твердой поверхности, имеющей заряды разных знаков, закрепляются *одиночные* молекулы ПАВ. Постепенно число таких молекул увеличивается, и они образуют сплошной молекулярный ворс *первичного монослоя*.

Вслед за первым монослоем формируется второй, третий и т.д., до 20–50 слоев, пока не достигается *насыщение граничного слоя* молекулами адсорбата. В дальнейшем наступает *динамическое равновесие*: скорости адсорбции и десорбции уравниваются, и толщина граничного слоя не изменяется.

**Свойства граничных слоев**

При взаимном перемещении поверхностей трения «ворсинки» как бы изгибаются в противоположные стороны.

Граничный слой обладает *анизотропией свойств*.

В *нормальном* к поверхности трения *направлении* граничный слой обладает высоким сопротивлением сжатию: 102 – 104 МПа. При этом наблюдаются упругие деформации.

В *тангенциальном* *направлении* молекулярные слои легко изгибаются и скользят относительно друг друга.

При ориентации молекул перпендикулярно к поверхности трения приложение тангенциальной силы вызывает изгиб молекул на поверхностях сопрягаемых тел в противоположные стороны. Сопротивление относительному перемещению тел незначительно.

Если молекулы смазочного материала расположены параллельно поверхности (силиконовые соединения), трение может рассматриваться как гидродинамическое в тонком слое (механизм трения подобен механизму при жидкостном трении). В этом случае наиболее важной характеристикой является вязкость масла.

**Механизм трения.**

*Механизм трения* при граничной смазке представляется в следующем виде. Под действием нормальной нагрузки возникают упругая и пластическая деформации на площадках контакта, на которых может реализовываться взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки (*А*2 –мономолекулярный слой).

На отдельных, наиболее нагруженных площадках, а также при их локальном нагреве возможно нарушение сплошности граничного слоя и возникновение адгезионного взаимодействия между оксидными пленками сопрягаемых металлов (*А*3 – контакт оксидных пленок).

A4

A1

A2

A3

Рис. Схема реального граничного слоя:

*А*1 – металлический контакт; *А*2 – мономолекулярный слой;

*А*3 – контакт оксидных пленок; *А*4 – полимономолекулярный слой

Кроме того, на площадках контакта может произойти временное разрушение смазочной пленки (адсорбционной и оксидной) и даже схватывание металлов на микрошероховатостях. Это будет вызывать дополнительное сопротивление движению (*А*1 – металлический контакт). В дальнейшем, благодаря адсорбции, такие металлические участки снова покрываются смазочным слоем, т.е. «залечиваются», и т.д.

Слабо нагруженные неровности поверхностей трущихся тел разделены полимолекулярным граничным слоем (*А*4 – полимономолекулярный слой)

**Влияние параметров**

Сила трения и коэффициент трения при граничной смазке зависят от многих факторов.

Прочность пленки зависит от молекулярных свойств граничной пленки, свойств контактирующих поверхностей и от температуры. Наиболее чувствителен к колебаниям температуры параметр *f*мол. С уменьшением температуры величина *f*мол уменьшается.

***Микрогеометрия поверхности.***

При увеличении *шероховатости* коэффициент трения переходит через минимум, причем, чем тоньше пленка смазки, тем влияние этого параметра выражается более отчетливо (рис. ).

f

Rz

h=20Å

h=6000Å

h=20000Å

Рис. Влияние Rz на величину коэффициента трения

При граничном трении скольжения минимальному трению соответствует оптимальная шероховатость порядка *Rz* = 0,1 мкм.

**Скорость скольжения.**

Скорость скольжения влияет на коэффициент трения неоднозначно. Коэффициент трения зависит от уровня скоростей (низкие, высокие) и от типа смазочного материала.

В области *низких скоростей* *для чистых минеральных масел* коэффициент трения уменьшается при увеличении скорости (кривая 1 на рис., а) и в некоторый момент стабилизируется. Это объясняется сокращением времени жизни фрикционных связей, уменьшением площади, числа и размеров пятен контакта и уменьшением вероятности разрушения граничного слоя.

При использовании в качестве смазки составов на основе *жирных кислот* коэффициент трения возрастает (кривая 2 на рис., а). В этом случае играет важную роль вязкость смазки. Сопротивление граничных слоев сдвигу возрастает с увеличением скорости, их поведение становится подобным поведению твердого тела, что приводит к увеличению коэффициента трения.

При *высокоскоростном граничном трении* основную роль играет вязкость смазки. С ростом скорости скольжения увеличивается температура в зоне контакта, что приводит к разориентации, а на отдельных участках и разрушению граничных слоев. Это приводит к увеличению возможности локального схватывания трущихся тел. С уменьшением толщины граничного слоя (переход от кривой 2 к кривой 1 на рис., б) зависимость более ярко выражена.

f

v

1

2

v

f

1

2

а)

б)

Рис. Влияние скорости скольжения на коэффициент трения при граничной смазке: а – низкие значения скорости, б – высокие значения скорости

**Температура.**

В ряде случаев наблюдается рост коэффициента трения при увеличении температуры. Это объясняется тем, что граничное трение в отдельных точках фактического контакта переходит в сухое трение. При низких температурах, когда граничный слой находится в твердом состоянии, нагрев поверхности трения снижает сопротивление сдвигу, плоть до перехода его в квазижидкое состояние.

Это приводит к сниженю коэффициента трения. Коэффициент трения падает по мере приближения к точке плавления смазки и резко возрастает при переходе к смазке с низкой вязкостью η (рис.).

T, °С

f

η1

η2

η1<η2

Рис. Влияние температуры на коэффициент трения

**Нормальная нагрузка (давление).**

При увеличении *нагрузки* коэффициент трения резко уменьшается. Падение коэффициента трения с ростом давления объясняется тем, что при увеличении нагрузки толщина пленки смазочного материала уменьшается. Поскольку тонкие слои смазки имеют большее сопротивление на сдвиг, сила трения увеличивается, однако медленнее, чем растет нагрузка (рис.).

Начиная с точки *В*, утонение пленки прекращается. На участке *АВ* имеется достаточно толстый слой смазки, вследствие чего в этом слое молекулы жидкости не связаны так прочно с твердым телом.

Fn (p)

f

A

B

C

Рис. Влияние нормальной нагрузки (давления) на коэффициент трения

При достижении *очень высоких* давлений увеличение сил взаимодействия по мере сближения поверхностей сопровождается разрушением граничных слоев на отдельных пятнах контакта. Соответственно, коэффициент трения увеличивается (после т. *C*).

**Вязкость смазки.**

Вязкость масла при граничной смазке не оказывает значительного влияния на процесс трения. Для снижения коэффициента трения применяют такой смазочный материал, молекулы которого обладают слабым взаимодействием между собой (оказывают слабое сопротивление сдвигу) и сильным взаимодействием с поверхностями твердых тел. Это свойство масел называют *маслянистостью*. Ее оценивают с помощью профилографа, сравнивая профилограммы смазанной и несмазанной поверхностей . Чем больше по абсолютной величине Δ, тем выше маслянистость и меньше вероятность разрыва граничной пленки и образования мостиков сварки.

С увеличением *толщины* слоя смазки коэффициент трения падает до тех пор, пока не начинают проявляться объемные свойства смазочного материала.