

УДК 621.891:539.375(043.2)

А.Ф. Аксенов, А.У., Т.Т. Ибраимов, Аль-Тамими, Д.А. Стельмах
Национальный авиационный университет**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ**

Представленный компрессионно-вакуумный механизм трения применим для каждого из трёх самостоятельных разделов трибологии – гидродинамического, эластогидро-динамического трения, а также при трении в условиях граничной смазки, а использование этих сведений позволит по-новому подойти к решению проблем трения и изнашивания.

Ключевые слова: *граничные слои, смазочные материалы, трение и износ, трибология, динамика трения.*

Постановка проблемы. Исходя из результатов экспериментальных исследований молекулярной физики граничного трения, эпитропные слои жидкой среды, которые образуются на лиофильных поверхностях твёрдых тел при их статическом сжатии, разрушить невозможно, вплоть до контактных напряжений упругости самых прочных сталей и даже алмаза [1..3]. Следовательно, при трении адсорбированных на поверхностях граничных слоёв, их разрушение и изнашивание поверхностей связано с определённым физическим процессом возникновения условий деструкции молекул эпитропных приповерхностных жидко-кристаллических (ЭЖК) структур, что приводит к фрикционному взаимодействию практически сухих участков рабочих поверхностей трибосистем их адгезии и изнашиванию. В соответствии с выдвинутой гипотезой о компрессионно-вакуумной (КВ) природе трения [4], такие условия возникают в диффузорных участках трибоконтактов, где установлено возникновение и протекание процесса разрежения и вакуумирования среды. Как известно [1], именно вакуумирование является самым эффективным и широко используемым методом для очистки поверхностей твёрдых тел от молекул жидкой среды.

На рис.1 показана схема уменьшения максимальных контактных напряжений в поверхностях за счет наличия на них эпитропных ЭЖК-слоёв смазочной среды путем увеличения площади и соответствующего уменьшения и перераспределения контактных поверхностных напряжений в статических условиях сжатия.

В поперечном сечении контакт бесконечно длинного вала 1 с поверхностью неподвижного подшипника скольжения 2 находится в покое при атмосферном давлении окружающей среды $P_{oc}=0,1$ МПа. В среде воздуха под действием силы N_g поверхности упруго деформируются, создают линейный контакт A_aB_a с шириной b_a и в них возникают контактные напряжения σ_a , с распределением по Г.Герцу (рис.1). Когда лиофильные поверхности смочены смазочной средой и также сжаты силой N_g , то они упруго деформируются посредством одноосно сжатых эпитропных граничных слоёв смазки, которые имеют некоторую толщину d [3]. В этих слоях развивается давление, равное поверхностным напряжениям σ_a , оно уменьшает напряжение, возникающее в поверхностях на воздухе, и перераспределяется так же симметрично относительно оси приложенной нагрузки N_g , как и в поверхностях σ_a , что приводит к расширению контакта A_aB_a с шириной b_a до A_dB_d с шириной b_d . То есть сжатые поверхностями молекулярные ЭЖК-слои жидкости воспринимают лишь осевые сжимающие давления, а их толщина тем меньше, чем выше контактные напряжения. ЭЖК-слои, имеющая свойства кристаллической субстанции, при деформировании подчиняются закону Гука. При этом у кромок ЭЖК-контакта A_dB_d , контактные напряжения будут соответствовать давлению окружающей среды, например, атмосферному, а толщина граничных ЭЖК-слоёв будет максимальной и равной $2d$. Следовательно, контакт сжатых поверхностей с ЭЖК-слоями смазки A_dB_d представляет собой зазор, симметрично сужающийся от кромок A_d и B_d до середины, где давление ЭЖК-слоёв и контактные напряжения поверхностей максимальны.

Результаты экспериментальных исследований. Взяв вышеприведенные начальные условия формирования упругого контакта поверхности, образующей цилиндр ролика и плоской грани параллелепипеда, которые разделены также упруго одноосно-напряженными двумя граничными ЭЖК-слоями толщиной d за основу, процесс трения скольжения вала, вращающегося вокруг своей оси в жидкой среде, с позиций КВ-гипотезы представляется следующим образом.

Рассмотрим вращение вала 1 (рис. 2) вокруг своей оси со скоростью ω в жидкой среде в нормальных атмосферных условиях с давлением окружающей среды $P_{oc}=0,1$ МПа.

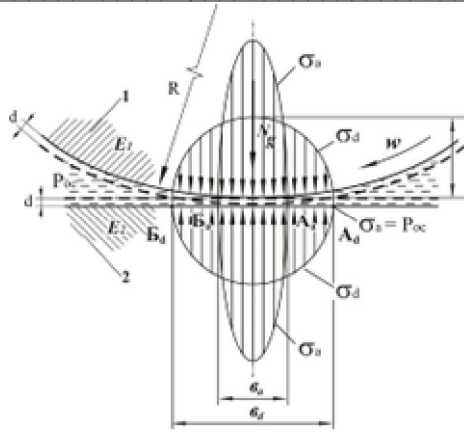


Рис.1. Схема образования линейного контакта $A_d B_d$ шириной b_d поверхности, образующей цилиндр ролика 1 и поверхности плоской грани параллелепипеда 2 под действием осевой силы N_g и возникновения в них контактных напряжений σ_a на воздухе и его расширение до $A_d B_d$ с шириной b_d и соответствующим уменьшением контактных напряжений до σ_d с учетом наличия на поверхностях ЭЖК-слоев толщиной d

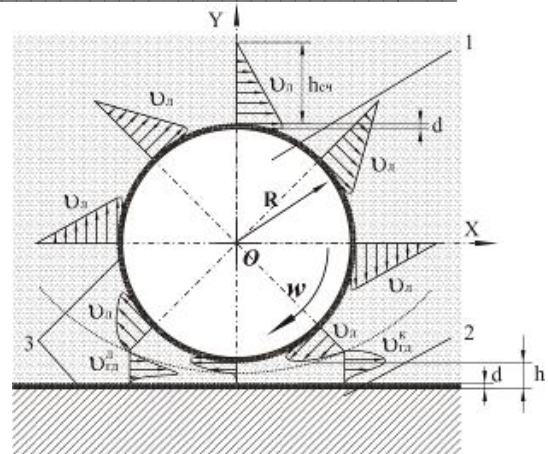


Рис. 2. Схема возникновения вторичных гидродинамических течений (конфузорного \vec{v}_{z0}^k и диффузорного \vec{v}_{z0}^o) в зазоре h между вращающимся роликом 1 и плоской гранью параллелепипеда 2 с ЭЖК-слоями 3, толщиной d , над которыми на высоте $h_{сч}$ структурно-чувствительные граничные слои жидкости имеют пренебрежимо малую скорость

В случае отсутствия какого-либо препятствия около поверхности образующей цилиндр вала, эпюры скоростей граничных слоёв смазочной среды будут иметь вид, характерный, например, Ньютоновской жидкости в виде прямоугольника. Максимальную линейную скорость \vec{v}_l будут развивать ЭЖК-слои, которые имеют некоторую толщину d , так как они характеризуются свойствами анизотропных кристаллических структур [3]. В начале движения ЭЖК-слоёв начинается их трение по слоям покоящейся в объёме изотропной жидкости. Близлежащие к ЭЖК-слоям молекулы среды также начинают перемещаться, но с меньшей скоростью. По мере удаления сенсора давления от поверхности при определённой линейной скорости \vec{v}_l поверхности вала (примем малые скорости до 0,5 м/с) на некотором расстоянии $h_{сч}$ движение молекул среды будет крайне мало, а датчики давления на этом расстоянии будут указывать на практическое отсутствие изменения давления и течения жидкости. То есть движущиеся с поверхностью структурно-чувствительные граничные слои смазки в бесконечном объёме жидкой среды характеризуются некоторой высотой эпюры скоростей. На этой высоте $h_{сч}$ по нормали к поверхности, образующей цилиндр вала, чувствительность сенсоров к движению фрагментов среды снижается до 1 мм вод. ст., и теоретически можно предположить, что на расстоянии $h_{сч}$ скорость движения молекул жидкой среды практически равна нулю. В наших экспериментах [4] с помощью датчиков давления в среде моторных, гидравлических и других технических масел измеренная высота структурной чувствительности граничных слоёв $h_{сч}$ не превышала 2 мм. Это значит, что движение самых дальних слоёв масла от поверхности становилось не существенным уже на расстоянии до 1 мм при малых скоростях. На больших расстояниях от поверхности жидкость оставалась однофазной сплошной средой и без воздушной фазы.

При приближении препятствия к поверхности, образующей цилиндр вращающегося вала, в том числе и измерительного зонда, например, на плоской поверхности параллелепипеда, до расстояния меньше двух высот структурной чувствительности граничных слоёв среды $h_{сч}$ возникают вторичные течения среды (рис.2). В сужающемся по направлению движения вала зазоре, то есть в конфузорной его области, происходит истечение среды из него в обратную сторону движения вала со скоростью \vec{v}_{z0}^k . В расширяющейся части зазора, то есть в диффузорной области, происходит втекание жидкости в зазор со скоростью \vec{v}_{z0}^o из объёма. Эти течения возникают в силу повышения давления в конфузорной области зазора, до зоны его минимальной величины, где оно резко уменьшается до атмосферного. После этого в диффузорной части зазора

происходит соответствующее разрежение среды. Сжатие и разрежение среды, а также возникающие соответствующие вторичные течения из зазора и в зазор, направленные обратно вращению вала, приводят к росту потерь мощности электропривода, что подтверждается экспериментально.

Если продолжать перемещать плоскую преграду к ролику и приложить внешнюю нагрузку сжатия, то начнется контактное трение ЭЖК-слоев вала с ЭЖК-слоями плоской поверхности. На рис.3 представлена схема такого трения с распределением давлений в граничных слоях и возникновением контактных конфузурных и диффузорных течений, обратных направлению движения вала.

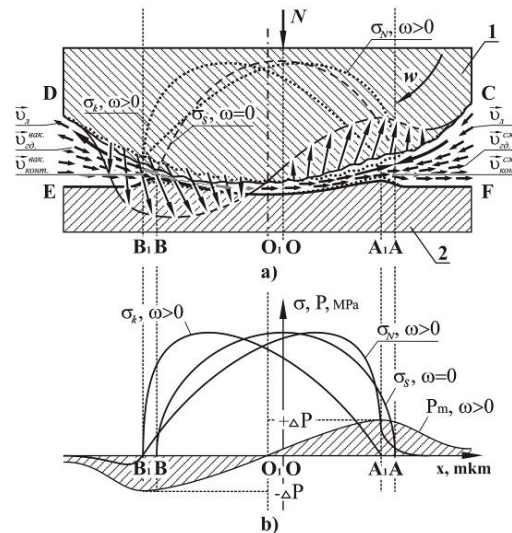


Рис. 3. Образование контактных вторичных компрессионных и вакуумных течений граничных слоёв смазки, направленных обратно скольжению. а) Схема гидродинамических процессов в трибосистеме скольжения «ролик 1 – подшипник 2» и смещение неподвижного контакта АОВ в направлении скольжения в зону А₁О₁В₁; б) распределение контактных напряжений в поверхностях трения σ_s без движения ($\omega=0$); распределение давлений в граничных слоях смазки P_m при трении ($\omega>0$); суммарное гидродинамическое давление граничной смазки и контактных напряжений, возникающих между контактирующими поверхностями σ_k при трении ($\omega>0$); суммарное поле реактивных напряжений, действующих нормально только на поверхность движущегося ролика σ_R при трении ($\omega>0$)

Перед входом вала в контакт в области CFAC, то есть в конфузурной части контакта ЭЖК-слоев жидкой среды (от сечения AA до сечения OO), образуются вторичные гидравлические течения среды, направленные в сторону, обратную движению вала. Они вызваны компрессией набегающих адсорбированных на поверхности вала слоёв смазки, которые движутся вместе с ней в контакт с максимальной скоростью, равной линейной скорости скольжения \vec{V}_l вращающейся поверхности. Первое обратное движению вала вторичное гидродинамическое течение возникает задолго до контакта. Оно образуется за счет упругих деформаций граничных слоёв, путем принудительного уплотнения молекул, то есть их сжатия в конфузурной приконтактной области CFAC, и направлено в обратную движению вала сторону со скоростью $\vec{V}_{сд}^{сж}$, за счет геометрического сужения канала, как показано ранее на рис.6. Экспериментально это наблюдается и фиксируется с помощью измерительного зонда давления при вращении вала вблизи (на некотором измеряемом расстоянии между валом и плоской поверхностью) как в жидкой, так и в газообразной среде.

Если, не останавливая вращение вала, приложить осевую нагрузку и создать упругий контакт АБ эпитропными слоями смазки (рис.3), то в конфузурной части контакта АО возникнет второе дополнительное обратное течение молекул граничных слоёв от области минимального зазора ОО₁ и максимального одноосного давления сжатия, равного σ_{max} , до кромки входа вала в контакт АА₁, где давление превышает атмосферное на величину степени сжатия граничных слоёв в приконтактной конфузурной области CFAC.

Это вторичное контактное течение начинается из зоны входа ролика в контакт АА₁, то есть из самой кромки касания деталей с граничными слоями среды до зоны ОО₁ с максимальными

контактными напряжениями σ_{max} , то есть из области минимального зазора граничных ЭЖК-слоёв смазки, и протекает принудительно. Оба течения обратной компрессионной струи ОА и набегающих адсорбированных слоёв смазки СА у самой передней кромки контакта А₁А входят практически в лобовое столкновение. То есть, происходит процесс, подобный известному в гидродинамике гидравлическому тарану, но в отличие от классического – однократного, гидротаран в случае подшипника скольжения непрерывен.

На выходе ролика из контакта по направлению скольжения в области ВВ₁ возбуждаются также два противоположных течения, но вакуумированием или растяжением ЭЖК-слоёв. Одно из них представляет собой адсорбированные молекулярные слои на поверхностях, в том числе ролика, с остаточными фрагментами смазки в минимальном зазоре, которые движутся вместе с поверхностью ролика из области от минимального зазора ОО₁ в область выхода его из контакта ВВ₁ со скоростью $v_{л.}$. Этот граничный слой оказывается в расширяющемся диффузорном канале, проходя путь от зоны ОО₁ до ВВ₁, где по пути движения происходит разрежение среды, то есть вакуумирование. Второй поток формируется из молекул среды, находящихся вблизи зазора ВВ₁ в объёме с давлением окружающей среды $P_{атм.}$. У самой кромки выхода ролика из контакта с плоскостью ВВ₁ объёмные фрагменты среды устремляются из области В₁Е в зону пониженного давления граничных слоёв ВВ₁ со скоростью $\vec{v}_{конт}^{сж}$, откуда поверхностью ролика выносятся разреженные фрагменты среды, которые, в свою очередь, пройдя путь от зоны ОО₁ до ВВ₁ под действием отрицательного градиента давлений оказались в диффузорном канале.

Вывод. Таким образом, показано, что гидродинамические эффекты трения в режиме граничной смазки обусловлены образованием областей, как с повышенным, так и с пониженным давлением в смазочном слое. Обоснованы перемещения зоны контакта трибосистемы скольжения, вызванные перераспределением давления в соответствующих конфузорной и диффузорной областях повышенного и пониженного давления контакта. Показано, что контактом двух смазанных поверхностей, сжатых с некоторой осевой силой, являются упруго деформированные эпиторпные жидко-кристаллические слои жидкости. В ЭЖК-контакте смазочный слой в статических условиях нагружения ведёт себя как высокопрочное и высокоупругое твёрдое тело, а в условиях высоких контактных градиентов давлений и скоростей – как жидкость.

Представленный компрессионно-вакуумный механизм трения применим для каждого из трёх самостоятельных разделов трибологии – гидродинамического, эласто-гидродинамического трения, а также при трении в условиях граничной смазки, а использование этих сведений позволит по-новому подойти к решению проблем трения и изнашивания.

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения.– М.:Физматгиз, 1963.– 472 с.
2. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
3. Алтоиз Б.А., Дейнека В.Т. Измерение параметров граничного слоя жидкости теплоносителя, влияющих на интенсивность теплообмена // Научно-технический сборник «Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры». – Одесса, 2003. – Вып.1. – 29-33 с.
4. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. Нац. Авиационный университет. – Киев, 2009. – Библиогр.: 14 назв. – Рус. Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009. – 43 с.