

ным 0,5 мкм, но поверхности которых получены различными технологическими приемами, подвергались трению по неподвижному плоскому образцу с одинаковой шероховатостью (менее 0,02 мкм). Испытания проводились в среде диалкилбензолового масла. Трение контртела, обработанного на круглошлифовальном станке, характеризовалось начальным износом 5 мкм и интенсивностью изнашивания 7 мкм в час. При этом величина коэффициента трения находилась в пределах 0,15...0,2, температура трения достигала 98 °С. При трении контробразцов, полученных другой технологией, (с таким же параметром Ra) начальный износ достигал 1 мкм, интенсивность изнашивания 0,3 мкм в час, коэффициент трения не превышал 0,1, а температура не превышала 75 °С.

Такое разительное отличие триботехнических свойств поверхностей с одинаковым параметром шероховатости Ra , измеряемым на стандартном профилометре, связана с тем, что процедура шлифования алмазным кругом на круглошлифованном станке при встречном вращении контробразцов и круга приводит к формированию на поверхности выступов. А при шлифовании вращающихся контробразцов путем прижатия неподвижного шлифовального материала приводит к образованию впадин. Следовательно, в первом случае вершины выступов имели геометрию, близкую к геометрии режущей кромки резца (рис. 2, а, б), а во втором случае вершины выступов имели геометрию плоских платформ и шероховатость в этом случае по Ахматову А.С. названа каньенообразной (рис. 2, в, г).

Исследование шероховатости поверхностей, полученных различными технологическими путями, контактными профилографами-профилометрами типа «Калибр» не показали каких-либо принципиальных различий ни по профилограммам, ни путем профилометрирования. То есть лишь использование бесконтактного лазерного сканирующего дифференциально-фазового акустооптического профилографа-профилометра ЛСДФМП позволило установить принципиальную разницу состояния поверхностей, полученных различными технологическими приемами. На рис. 2, б и рис. 2, г) (под профилограммами) показаны трехмерные изображения поверхностей контробразцов, полученных на ЛСДФМП, которые свидетельствуют о том, что параметр шероховатости Ra не отражает фактического состояния поверхности принципиально, т.е. является несостоятельным. Кроме этого, качественно новая информация о пространственном состоянии поверхностей деталей машин, получаемая на микроскопе-профилометре ЛСДФМП позволит разрабатывать новые технологические приемы доводки рабочих поверхностей с наиболее эффективной эксплуатационной микрогеометрией. Это крайне необходимо для машиностроения при изготовлении трущихся деталей машин, лопаток турбин и компрессоров, деталей прецизионной техники и т.д.

Внедрение ЛСДФМП в испытательно-измерительный трибологический

комплекс «NAU Friction Wear Test System» позволило существенно уменьшить погрешность получаемых трибологических характеристик конструкционных и смазочных материалов, а именно показателей их противоизносных и антифрикционных свойств, с 30 до 9 %. Таким образом, путем использования ЛСДФМП с высокой чувствительностью по профилю (1 нм) в трибологических испытаниях, существенно повышается воспроизводимость получаемых результатов, как на стадии контроля 3D топографии исходных трущихся поверхностей, так и при измерении величины износа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ И СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

Аксенов А.Ф., Стельмах А.У., Шевченко Р.А., Радзиевский В.А.

Национальный авиационный университет

Зависимость сил трения от скорости скольжения является одной из главных характеристик трибоконтакта. В трибологии ее принято называть «характеристикой трения» и рекомендуется учитывать при конструировании трибосистем. Экспериментальные данные, полученные в различных лабораториях, свидетельствуют о вариациях силы трения при увеличении скорости скольжения в зависимости от условий. В одних случаях она практически не изменяется, в других – возрастает, в третьих – уменьшается, а в условиях жидкостного трения при обильном смазывании контакта с увеличением скорости скольжения, как правило, наблюдается увеличение коэффициента трения до некоторого максимального значения, после которого сила трения уменьшается. При достижении критической скорости сила трения начинает возрастать, вплоть до схватывания.

Влияние скорости скольжения v на изменение силы трения видно из диаграммы Герси-Штрибека (рис.1), представляемой в виде зависимости коэффициента трения μ от характеристики подшипника, то есть от безразмерной величины $\lambda = \eta v/p$, где η - вязкость, p – осевая нагрузка. Эта характеристика по своей сути отражает толщину смазочного слоя. При значении $\lambda = \lambda^*$, соответствующем минимуму коэффициента трения μ , происходит переход от граничного трения к жидкостному. Кривая интенсивности изнашивания I показывает, что при $\lambda > \lambda^*$ контакт деталей размыкается, и износ теоретически исчезает.

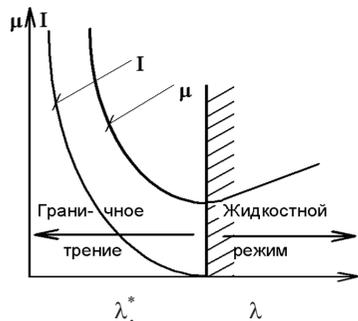


Рис. 1. Диаграмма Герси-Штрибека

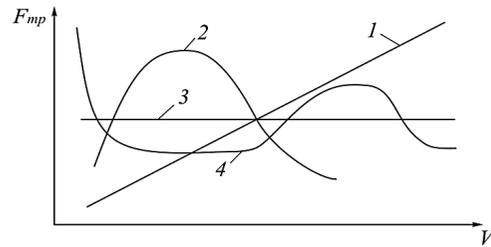


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения μ от скорости скольжения v в моторных маслах: 1 – линия Н.П. Петрова; 2 – по Д.С. Кодниру; 3 – адгезионно-деформационная теория граничного трения; 4 – по Б.И. Костецкому

Многочисленные экспериментальные данные об ЭГД-контакте со смазкой жидкими маслами свидетельствуют о нелинейной зависимости силы трения от скорости скольжения: в области малых и средних скоростей сила трения возрастает до максимума, а с дальнейшим повышением скорости она уменьшается. Такое изменение силы трения в ЭГД-теории противоречиво. При повышении скорости скольжения в несущем смазочном слое ЭГД-контакта давление возрастает, что приводит к увеличению его толщины, вязкости и силы трения. При увеличении скорости температура смазки повышается, толщина ее слоя и несущая способность уменьшаются, чем и объясняют некоторое увеличение силы трения до максимума (рис. 2) и повышение силы трения в области средних скоростей скольжения (0,2...0,5 м/с).

Дальнейшее повышение скорости скольжения, исходя из ЭГД-теории, приводит к более интенсивному локальному росту температуры и понижению вязкости масла, чем и объясняют снижение силы трения. Однако такое видение экспериментально не подтверждается, так как объемная температура масла увеличивается лишь на несколько градусов, а измерить гипотетически высокую локальную температуру в смазочном слое ЭГД-контакта (более 100 °С) пока не удавалось.

Эластогидродинамическая теория смазки базируется на ряде известных основных положений, характеризующих ЭГД-контакт. На рисунке 3 представлена зависимость давления p в смазочном слое толщиной h от расстояния по оси X относительно центра нагрузки O при движении плоской поверхности со скоростью V . Плоская подвижная поверхность с неподвижной поверхностью h_x образуют контакт протяженностью $[-aOa]$, где без трения возникают контактные напряжения p_n , при трении – p_x , а минимальная толщина смазочного слоя соответствует области выхода полуплоскости OX из контакта с поверхностью h_{min} .

Из основных положений ЭГД-теории смазки (рис.3) следует, что для повышения ресурса трибосистем необходимо реализовывать обильное смазывание контакта и избегать возможности возникновения условий масляного голодания. Теоретически трение ЭГД-контакта является безыносным, однако при эксплуатации трибосистемы качения и скольжения изнашиваются, что объясняется неустойчивостью режима трения в пуско-остановочные периоды работы. В ряде случаев обильное смазывание ЭГД-контакта приводит к увеличению интенсивности износа поверхностей, их выкрашиванию или к термическому разрушению. Увеличение расхода смазочного материала для обеспечения более интенсивного теплоотвода от ЭГД-контакта оказалось малоэффективным и, как показала практика, стает причиной дополнительного теплообразования особенно при высоких скоростях качения или скольжения (больше 10 м/с).

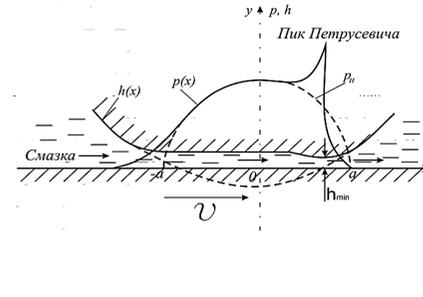


Рис 3. Зависимость давления p в смазочном слое толщиной h от расстояния (ось X) от центра нагрузки O при движении плоской поверхности со скоростью V в контакте с неподвижной поверхностью h_x протяженностью $[-aOa]$, где без трения возникают контактные напряжения p_n , при трении – p_x , а минимальная толщина смазочного слоя h_{min} .

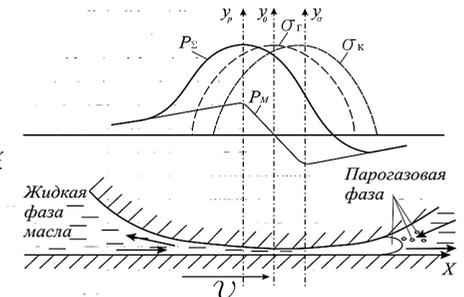


Рис.4. Схема контактно-гидродинамических процессов с позиций компрессионно-вакуумной теории трения

Вопрос о нелинейности поведения силы трения с ростом скорости скольжения или качения в жидкой смазочной среде, не находит удовлетворительного объяснения с точки зрения ЭГД-теории и по сути остаётся открытым.

В данной работе сделана попытка объяснить нелинейность характеристики подшипников с позиций предложенной А.У. Стельмахом компрессионно-вакуумной гипотезы (КВ) о природе трения. Исходя из КВ гипотезы, процессы, протекающие в эластогидродинамическом контакте, представляются несколько более сложными (рис. 4). При движении нижней плоской поверхности со скоростью V в конфузурной области из-за набегающего потока гра-

нических слоев возникают вторичные, обратные движению течения смазочной среды (показано стрелками). В диффузорной, расширяющейся области, при определенных скоростях возникает маслопаровоздушная фаза смазки и вторичные, обратные движению, течения из среды в контакт. Это происходит в соответствии с экспериментально-наблюдаемой закономерностью распределения давления в смазочном слое P_m , которое в конфузорной области выше, а в диффузорной ниже давления окружающей среды. При этом реактивные давления, возникающие на поверхности неподвижного криволинейного трибоэлемента P_c , представляют собой сумму герцевских напряжений σ и давления в смазочном слое P_m , а контактные напряжения σ_k следует рассматривать, как разницу герцевских напряжений σ и давления в смазочном слое P_m . При этом под термином «контактные напряжения», следует понимать те напряжения, которые возникают лишь в области разрежения, то есть в диффузорной части контакта, так как в конфузорной – поверхности раздвигаются граничными слоями с высоким давлением.

Характеристики сил трения при скольжении в среде авиационного моторного масла МС-20 проводились на лабораторном приборе трения АСБ-01. Линейный контакт создавался поверхностью образующей цилиндра ролика (модель вала) с плоской гранью неподвижного параллелепипеда (модель подшипника скольжения). В неподвижном образце было вмонтировано приемное устройство в виде щели с сечением 0,3x5 мм. Осевая нагрузка составляла 20 Н, ширина контакта – 9 мм. Контакт помещался в специальную ванночку, которая заполнялась маслом МС-20. На расстоянии 2 мм от самого контакта в области входа вала в контакт размещалось приемное устройство в виде щели, которое через внутренние каналы образца-параллелепипеда сообщалось с датчиком давления. Это позволило экспериментально определять давление P в конфузорной области контакта и величину силы трения $F_{тр}$ по изменению мощности электропривода постоянного тока при различных скоростях скольжения одновременно. Оптическая прозрачность неподвижного образца и ванночки, изготовленная из стекла, позволяли наблюдать за течениями в околоконтактной области, а также за агрегатным состоянием масла МС-20.

Линейная скорость скольжения поверхности образующей цилиндра фторопластового ролика изменялась плавно от 0,4 до 2,5 м/с, с шагом 0,2 м/с и выдержкой в течение 10 минут, когда все параметры стабилизировались. При постоянной осевой нагрузке 2 Н, комнатной температуре и атмосферном давлении окружающей среды измерялись давление смазки через приемное устройство и потери мощности электропривода. Графики зависимостей силы трения $F_{тр}$ и давления ΔP_0 в слоях смазки от скорости скольжения через 1 минуту после установления определенной скорости $v_{д}$, представлены на рис.4. Аналогичные зависимости были получены при тех же скоростях, но через 10 минут трения.

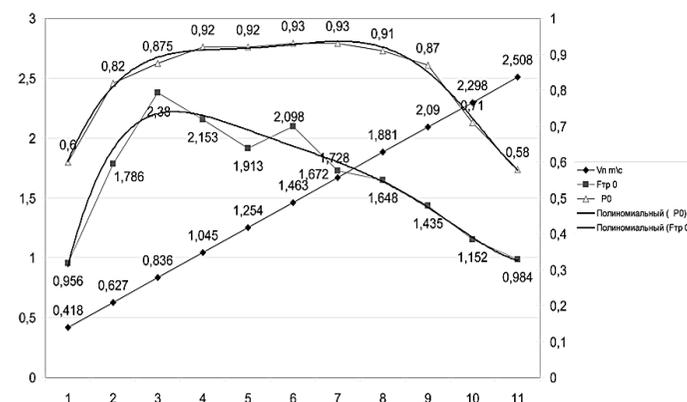


Рис.4. Зависимость силы трения $F_{тр0}$ и избыточного давления ΔP_0 от скорости и линейного скольжения $v_{д}$ через 1 минуту после выхода на скоростной режим

Как видно из полученных зависимостей (рис.4), при данных условиях трения в режиме жидкостной смазки с увеличением скорости сила трения возрастает от 0,1 до 0,6 м/с, после чего наблюдается ее уменьшение. Давление в конфузорной области контакта ведет себя аналогично: синхронно с силой трения возрастает до максимальных значений, после чего оно уменьшается также как и сила трения. Визуальное наблюдение показало, что с увеличением скорости в прозрачном масле МС-20 происходило возникновение воздушных пузырьков. Во времени их количество возрастало. Повышение скорости скольжения приводило к росту интенсивности их образования в масле МС-20. При скорости 0,6 м/с масло теряло прозрачность и при дальнейшем увеличении частоты вращения ролика превращалось в непрозрачную однородную масловоздушную смесь в виде суспензии белого цвета. Объемная температура масла к концу серии испытаний повышалась на 4 °С.

Таким образом, использованием масловоздушной смеси вместо гомогенной однофазной жидкой смазки достигается повышение эффективности трибосистем, что подтверждает основные положения компрессионно-вакуумной (КВ) гипотезы о природе трения. Это явление наблюдается при пуске холодных двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Выводы: 1. Причиной нелинейного изменения силы трения (увеличения до максимума и дальнейшего уменьшения) при увеличении скорости скольжения ЭГД-контакта, обильно смазанного моторным маслом является переход его из гомогенного прозрачного жидкого состояния в мезогенную масло-воздушную фазу суспензии.

2. Образование масловоздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению коэффициента сжатия и растяжения исходно жидкой смазочной среды. Уменьшение сил сжатия смазочных слоёв в конфузурной области контакта и разрежения в диффузорной приводит к снижению интегральной вязкости, скорости вторичных обратных течений, температуры и силы трения.

3. При проведении трибологических лабораторных испытаний смазочных материалов следует учитывать фактическое фазовое состояние смазочной среды (особенно при испытаниях смазочных материалов и присадок к ним на средних и больших скоростях). Фазовое состояние смазочных материалов может оказывать существенное влияние на результаты при оценке эффективности смазок с разными реологическими свойствами.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ С ЭГД-КОНТАКТОМ

Аксенов А.Ф., Стельмах А.У., Бадир К.К., Хуссейн Д.Д.

Национальный авиационный университет

Исследования подтвердили важность и перспективность учета упругости материалов, что привело к развитию эластогидродинамической теории (ЭГДТ) трения, когда высокие давления в масляном клине вызывают упругую деформацию контактирующих тел, в результате чего величина зазора между деталями возрастает (рис.1).

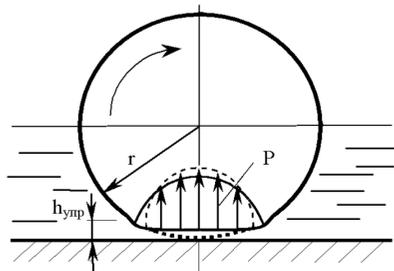


Рис. 1. Схема эластогидродинамического эффекта в подшипнике скольжения

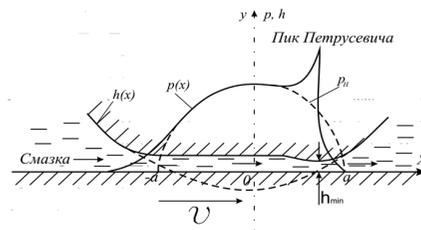


Рис. 2 – Характерные признаки ЭГД-контакта

Самую распространённую и теоретически обоснованную эластогидроди-

намическую (ЭГД) теорию смазки представляют с помощью классической схемы ЭГД-контакта (рис.2). Неподвижная плоская поверхность при сжатии и без перемещения с неподвижной поверхностью h_x реализует контакт протяженностью [-aOa]. Под действием сил сжатия без трения в поверхностях возникают контактные напряжения p_H , а при движении со скоростью V давление в граничном слое p_x отождествляется с контактными напряжениями, где выделяют наличие пика Петрусевича в области выхода движущейся поверхности из контакта, где толщина смазочного слоя h_{min} минимальна.

ЭГД-теория построена на следующих основных положениях.

1. Ресурс областей ЭГД-контакта определяется предельно допустимой толщиной смазочного слоя, которая должна превышать сумму высот микронеровностей контактирующих поверхностей.

2. Считается, что смазочная пленка в контакте, образованная жидкой средой, является однофазной ньютоновской жидкостью на протяжении всего контакта.

3. Пленка смазки в ЭГД-контакте практически параллельна в его центральной части и сужается в районе выхода движущейся поверхности из него.

4. Напряжения в поверхностях ЭГД-контакта отождествляются с давлением в смазочном слое.

5. Контактные напряжения в поверхностях соответствуют расчетным значениям по Г. Герцу и отмечается наличие второго максимума давления (так называемый пик Петрусевича) в области выхода подвижного элемента трибосистемы из ЭГД-контакта.

6. Считается, что толщина слоя смазочного материала в ЭГД-контакте, как определяющий критерий работоспособности узлов трения, находится в диапазоне 0,1...1 мкм при герцевском давлении 1 ГПа, а время прохождения смазки через контакт составляет $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с.

Из базовых положений ЭГД-теории смазки следует, что для повышения ресурса трибосистем необходимо реализовывать обильное смазывание контакта и избегать возможности возникновения условий масляного голодания. Теоретически трение ЭГД-контакта является безыносным, однако реальная эксплуатация трибосистем качения и скольжения показала, что все они изнашиваются, что объясняют неустойчивостью режима трения на пусковых режимах. В ряде случаев обильное смазывание ЭГД-контакта приводит к увеличению интенсивности изнашивания и выкрашивания поверхностей или к термическому разрушению. Увеличение расхода смазочного материала для обеспечения более интенсивного теплоотвода от ЭГД-контакта оказалось малоэффективным способом и, как показала практика, является причиной дополнительного теплообразования.

Экспериментально установлено, что с увеличением скорости скольже-