

УДК 621.891:539.375(043.2)

А.Ф. Аксенов, А.В. Стельмах, К.К. Бадир, Д.Д. Хуссейн<sup>1</sup>, Э.Л. Селезнев<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный авиационный университет<sup>2</sup>Луцкий национальный технический университет

## АНАЛИЗ ФАЗОВОГО СОСТАВА СМАЗКИ В ЗАДАЧАХ ТРЕНИЯ

Показано, что агрегатное состояние смазочных материалов в ходе их трибологических испытаний является одним из первостепенных факторов, определяющих силу трения и интенсивность изнашивания модельных трибосистем. Барботажи и кавитационные явления в контактах при определенных условиях (скорость скольжения, нагрузка) приводят к возникновению масловоздушной смеси, что необходимо учитывать при оценке качества смазочных материалов. Ключевые слова: смазочные материалы, кавитация, трибологические испытания, масловоздушная смесь, скольжение.

**Постановка проблемы.** 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).

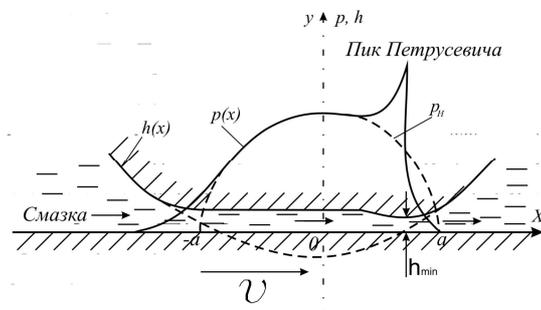
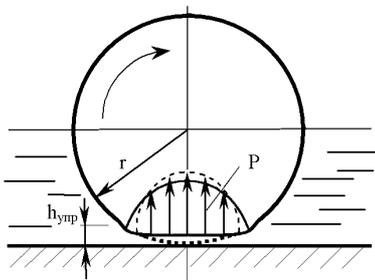


Рис. 1. Схема эластогидродинамического эффекта в подшипнике скольжения

Рис. 2. Характерные признаки ЭГД-контакта [1]

Самую распространённую и теоретически обоснованную эластогидродинамическую (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  $p_n$ , 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  $0,1 \dots 1$  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.

**Результаты экспериментальных исследований.** Экспериментально установлено, что с увеличением скорости скольжения в ЭГД-контакте сила трения в области малых скоростей возрастает. Затем, достигнув максимальных значений, уменьшается, что объясняют уменьшением вязкости масляного клина за счет увеличения температуры в смазочном слое. Известно, что при исследовании влияния скорости качения на реологические характеристики трансмиссионных смазочных материалов показали, что эффективная вязкость смазочного слоя с увеличением скорости существенно уменьшается, а толщина смазочного слоя увеличивается. Это объясняет повышение эффективности смазки за счет снижения напряжений сдвига смазочных слоев и локализации вектора напряжения сдвига в них, где влияние твердых поверхностей минимально.

Путём совместного решения гидродинамической и упруго-деформационной задач взаимодействия среды и поверхностей трибоконтакта, с учетом реологических термодинамических процессов, протекающих в среде, были получены формулы для силы трения и других параметров трибосистем. Эти зависимости оказались настолько громоздкими, что в практике конструкторско-инженерных расчетов они не используются. Коэффициент трения реальных трибосистем на один два порядка больше расчетных и достигает значений 0,01-0,1, что характерно для следующего, еще более нагруженного режима – трения в условиях граничной смазки. При этом поверхности хоть и с очень малой интенсивностью, но изнашиваются, особенно в пуско-остановочных циклах эксплуатации узлов.

Учитывая упругую деформацию поверхностей трения, ЭГД-теория трения между двумя поверхностями трактуется, как сопротивление перемещению одних слоёв смазки, движущихся в направлении движения поверхностей, относительно других слоёв, находящихся в покое. При реализации гидро- и эластогидродинамического эффектов в трибосистемах скольжения коэффициент трения привлекательно мал 0,0001 и 0,005 соответственно, но габариты таких подшипников слишком велики, а удельные нагрузки слишком малы, чтобы их использовать во всех узлах трения. Даже при незначительном повышении нагрузки трибосистема становится крайне неустойчивой и начинает входить в режим, выделенный в трибологии как отдельная отрасль знаний - трение в условиях граничной смазки.

Авторы ЭГД-теории контактной гидродинамики смазки деталей машин (Н.Д.Коднир) сетовали на отсутствие средств быстрого расчета контактных напряжений с учетом шероховатостей поверхностей, физико-химических свойств конструкционных и смазочных материалов и других факторов из-за громоздкости формул. Сейчас имеется быстродействующая вычислительная техника и современная математическая программная среда, которые позволяют с лёгкостью производить самые сложные расчеты параметров практически любых динамических процессов, в том числе и процессы трения в трибосистемах и практически мгновенно. Однако на практике многочисленные теоретические наработки в области трения и изнашивания практически нигде не используются. На наш взгляд, это связано с недостаточно полным представлением о самой природе процесса трения.

Многочисленные экспериментальные данные и опыт эксплуатации трибосистем с ЭГД-контактами показал, что они на практике не есть безыносными, что предполагает теория ЭГДТС. С малой интенсивностью, но поверхности изнашиваются.

Обращает на себя внимание термоэффект, который был обнаружен и изучался профессором Н.Ф.Дмитриченко. При трении качения, в динамике, достоверно наблюдалось возникновение в смазочном слое зоны с повышенной температурой, которая находилась в области входа поверхностей в ЭГД-контакт, то есть перед контактом. Объяснить такое распределение температур, когда принято считать, что самое интенсивное тепловыделение происходит в области выхода поверхностей из контакта, с позиций существующих теорий не удаётся. Поэтому обнаруженное явление рассматривается, как эффект.

Экспериментальные данные, полученные в лаборатории нанотриботехнологий НИЧ НАУ, легли в основу компрессионно-вакуумной гипотезы о природе трения и трибокавитационном механизме изнашивания. Основным положением этой гипотезы является самопроизвольное

возникновение относительно минимального зазора каждого элементарного трибоконтакта двух характерных областей. В области уменьшения зазора по направлению скольжения и/или качения, т.е. конфузорной, происходит повышение давления в граничных слоях смазки и возникновение вторичного течения, противоположного направлению движения. В этой области при высоких скоростях трение происходит между набегающими с движущейся поверхности слоями граничной смазки и слоями вторичного обратного течения, вызванного градиентом давлений в сужающейся зоне трибоконтакта.

В диффузорной области увеличения зазора по направлению качения и/или скольжения, происходит разрежение граничных слоев и уменьшение давления в них относительно давления окружающей среды до значений, равных и меньших давления насыщенных паров смазочной среды. Здесь возникает вторичное течение, направленное из окружающей среды в контакт и против движения. Эти течения также вызваны градиентом давлений, но отрицательным в направлении движения. При этом в диффузорных областях ЭГД-контактов, особенно при высоких скоростях (больше 0,1 м/с), происходит нарушение однородности смазочного слоя с образованием маслопаровоздушных полостей пузырьковой кавитации, которая характеризуется самопроизвольным возникновением паровоздушных пузырьков и их схлопыванием у поверхности трения, что также приводит к её нагреву.

В отличие от ЭГД-теории, компрессионно-вакуумная гипотеза трения основана на принципиально новых положениях:

1. Толщина смазочного слоя в ЭГД-контакте не отражает его трибологические свойства, так как в диффузорных областях даже при малых скоростях скольжения происходит разрежение смазочной среды, что приводит к ее фазовому переходу из жидкого с масловоздушное состояние. Следовательно, о какой-либо, в том числе минимальной толщине субстанции неопределенного масла - паровоздушного агрегатного состояния говорить не приходится. Поэтому минимально допустимая толщина смазочного слоя не может служить однозначным критерием ресурса трибосистем с ЭГД-контактом.

2. Смазочная пленка в ЭГД-контакте, а именно в его диффузорной области, не является однофазной ньютоновской средой, а представляет собой масловоздушную два граничных слоя трущихся поверхностей с паровоздушным вакуумированным пространством между ними.

3. Пленка ЭГД-контакта, образованного криволинейными поверхностями при трении, не параллельна в его центральной части, а является адекватным отражением распределения герцевских контактных напряжений, под действием которых она упруго деформируется. То есть, минимальная толщина слоя в статических условиях сжатия будет находиться в области максимальных контактных напряжений.

4. Экспериментально наблюдаемая в области выхода поверхности трения из контакта минимальная толщина смазочного слоя и отмечаемый в соответствии с ЭГД-теорией пик контактных напряжений Петрусевича вызваны вакуумированием смазочного слоя в диффузорной области контакта.

5. В процессе трения в смазочном слое относительно его минимального зазора самопроизвольно возникает сжатие смазочных слоев в конфузорной и их растяжение – в диффузорной областях ЭГД-контакта. Таким образом, давление в смазочном слое не тождественно поверхностным контактным напряжениям, определяемым по Г.Герцу. Это значит, что понятия «контактные напряжения», «давление в смазочном слое» и «давления на трущихся поверхностях» необходимо скорректировать в соответствии с экспериментальными данными, положенными в основу компрессионно-вакуумной гипотезы трения и трибокавитационного механизма изнашивания.

6. В отличие от ЭГД-теории, в рамках компрессионно-вакуумной гипотезы трения через ЭГД-контакт смазочная среда поступает из конфузорной в диффузорную область ровно в том количестве, сколько его находится в минимальном зазоре, в том числе и в упруго-напряженном состоянии сжатия, что не противоречит закону сохранения количества вещества.

Для проверки эффективности использования масловоздушной смеси в трибосистеме скольжения был проведен ряд экспериментов на лабораторных машинах трения АСБ-01 и АСБ-02 [10], где в качестве рабочей среды использовались моторные масла МС-20 и ИПМ-10. Применение паровоздушной масляной суспензии, по сравнению с ее жидким однофазным состоянием, приводило к существенному (на 20-30%) уменьшению сил трения и на 5...7<sup>0</sup>С снижению температуры нагрева среды при прочих равных условиях трения (нагрузка, скорость). На рис.3 представлен вид однофазной жидкой среды в начале трения при частоте вращения модельного

вала  $200 \text{ мин}^{-1}$  при отсутствии трибоконтакта и самопроизвольного ее перехода в двухфазное маслопаровоздушное состояние через 10 минут трения после создания линейного трибоконтакта, что привело к образованию двухфазной маслопаровоздушной смеси в диффузорной области контакта, что, в свою очередь, привело к самопроизвольному увеличению скорости до  $350 \text{ мин}^{-1}$ . В течение этих 10 минут наблюдалось насыщение объема масла микропузырьками, образованными в диффузорной области ЭГД-контакта. При этом сила трения скольжения уменьшалась на 30...40%.

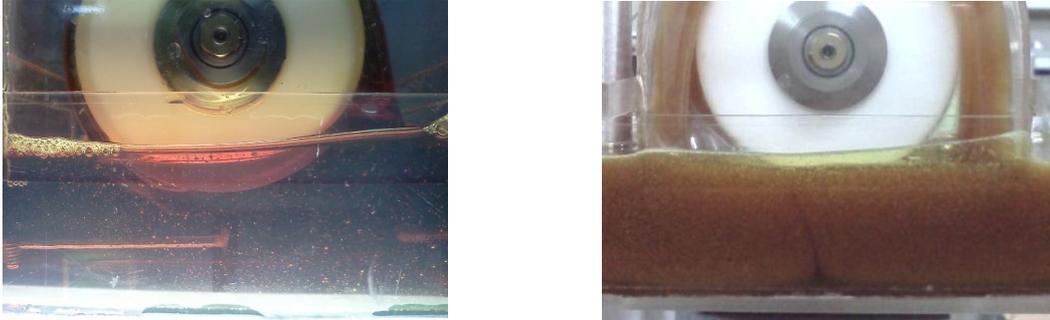


Рис.3. Вид однородной однофазной прозрачной смазочной среды в однофазном (а) и двухфазном (б) состояниях: а - при отсутствии трибоконтакта и постоянной частоте вращения модельного вала  $200 \text{ мин}^{-1}$ ; б - образование двухфазной непрозрачной маслопаровоздушной смеси при трибокавитации в линейном контакте после 10 минут трения и частоте вращения вала до  $350 \text{ мин}^{-1}$ , которая увеличилась за счет двухфазности смазочной среды

**Вывод.** Агрегатное состояние смазочных материалов в ходе их трибологических испытаний является одним из первостепенных факторов, определяющих силу трения и интенсивность изнашивания модельных трибосистем. Барботажи и кавитационные явления в контактах при определенных условиях (скорость скольжения, нагрузка) приводят к возникновению масловоздушной смеси, что необходимо учитывать при оценке качества смазочных материалов.

1. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: М., 1976– 304 с.