

УДК 621.891:539.375(043.2)

А.У. Стельмах, Д.Д. Хуссейн

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОКОНТАКТА ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ

Показано, что образование масло-воздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению на порядок коэффициентов сжатия и растяжения исходно жидкой смазочной среды, что в свою очередь обуславливает уменьшение степени сжатия смазочных слоёв в конфузальной и понижению степени их разрежения в диффузорной областях контакта, что является причиной снижения интегральной вязкости и силы трения

Ключевые слова: скорость скольжения, смазочная среда, трибоконтакт, сила трения

Рис. 5. Лит.10.

О.У. Стельмах, Д.Д. Хуссейн

ЗАКОНОМІРНІСТЬ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ КОВЗАННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОКОНТАКТА З ДОПОМОГОЮ ЗМІНИ АГРЕГАТНОГО СТАНУ МАСТИЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

Показано, що утворення масло-повітряної суспензії, викликане збільшенням швидкості обертання вала, призводить до збільшення на порядок коефіцієнтів стиснення і розтягування на початку рідкого мастильного середовища, що в свою чергу обумовлює зменшення ступеня стиснення мастильних шарів у конфузальній і пониження ступеня їх розрідження в дифузійній областях контакту, що є причиною зниження інтегральної в'язкості і сили тертя.

Ключові слова: швидкість ковзання, смазочна середу, трибоконтакт, сила тертя.

O. Stelmach, D. Hussein

THE PATTERN OF INFLUENCE OF SLIDING VELOCITY ON THE CHARACTERISTICS TRYBOKONTAKTA BY CHANGING THE PHYSICAL STATE OF LUBRICATING MEDIUM.

It is shown that the formation of oil-air suspension caused an increase in the speed of rotation of the shaft, resulting in an increase of the order of coefficients compression and tension at the beginning of lubricating liquid medium, which in turn causes a decrease in the degree of compression lubricant layers konfuzorniy and lowering the degree of vacuum in the diffuser regions contact, causing reduction integrated viscosity and friction.

Keywords: sliding speed, the oil medium tribocontacts, the friction force.

Постановка проблеми. 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 [1...3]. 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 [2]. При достижении критической скорости сила трения начинает возрастать, вплоть до схватывания [3].

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 [4].

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 [5...7]. 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 объёмная температура масла увеличивается лишь на несколько градусов, а измерить гипотетически высокую локальную температуру в смазочном слое ЭГД-контакта (более 100 °С) пока не удавалось.

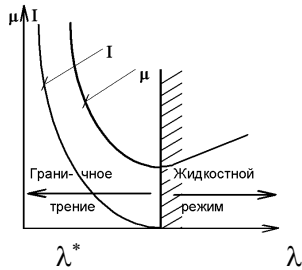


Рис. 1. Диаграмма Герси-Штрибека

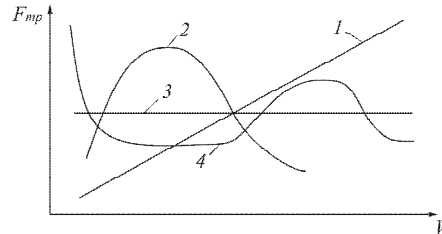


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения μ от скорости скольжения v в моторных маслах: 1 – линия Н.П.Петрова [8]; 2 – по Д.С.Кодниру [4]; 3 – адгезионно-деформационная теория граничного трения [3]; 4 – по Б.И.Костецкому [8]

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 , и 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).

Изложение основного материала статьи. 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 компрессионно-вакуумной гипотезы (КВ) о природе трения [9,10]. Исходя из КВ гипотезы, процессы, протекающие в эластогидродинамическом контакте, представляются несколько более сложными (рис.4). При движении нижней плоской поверхности со скоростью V в конфузорной области из-за набегающего потока граничных 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_Σ , представляют собой сумму герцевских напряжений σ_r и давления в смазочном слое P_m , а контактные напряжения σ_k следует рассматривать, как разницу герцевских напряжений σ_r 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 конфузурной – поверхности раздвигаются граничными слоями с высоким давлением.

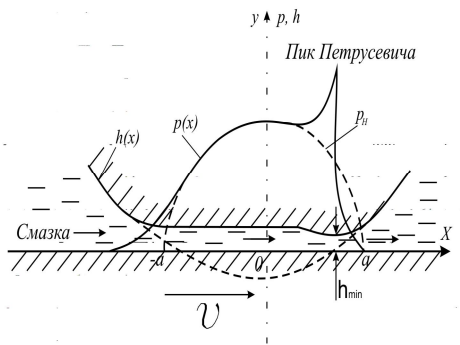


Рис.3. Зависимость давления p в смазочном слое толщиной h от расстояния (ось X) от центра нагрузки O при движении плоской поверхности со скоростью V в контакте с неподвижной поверхностью h_x протяженностью $[-aOa]$, где без трения возникают контактные напряжения p_n , при трении - p_x , а минимальная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

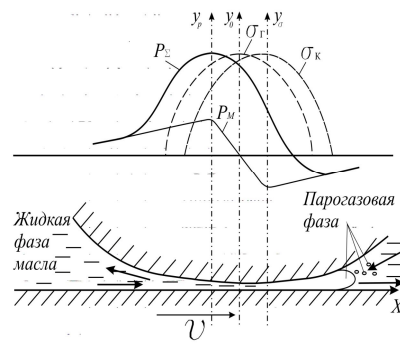


Рис.4. Схема контактно-гидродинамических процессов с позиций компрессионно-вакуумной теории трения

Характеристики сил трения при скольжении в среде авиационного моторного масла МС-20 проводились на лабораторном приборе трения АСБ-01. Линейный контакт создавался поверхностью образующей цилиндр 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 конфузурной 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 околосконтактной области, а также за агрегатным состоянием масла МС-20. Линейная скорость скольжения поверхности образующей цилиндр фторопластового ролика изменялась плавно от 0,4 до 2,5 м/с, с шагом 0,2м/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 приёмное устройство и потери мощности электропривода. Графики зависимостей силы трения $F_{тр0}$ и давления ΔP_0 в слоях смазки от скорости скольжения через 1 минуту после установления определенной скорости v , представлены на рис.4. Аналогичные зависимости были получены при тех же скоростях, но через 10 минут трения.

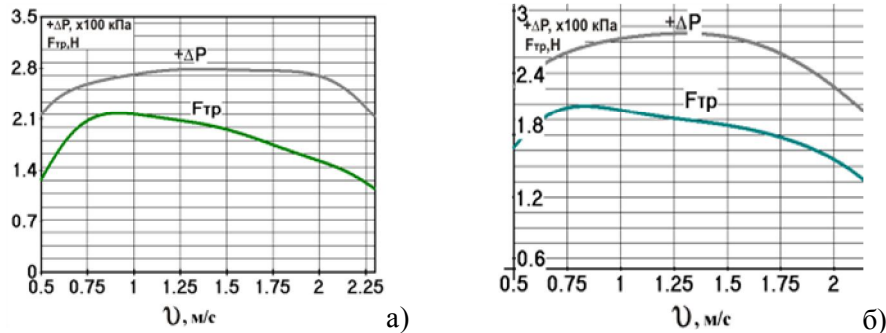


Рис. 5. Зависимость силы трения $F_{тр}$ и максимального избыточного давления ΔP от скорости линейного скольжения v при осевой нагрузке 4 Н через 1 мин. (а) и через 10 мин. (б) после выхода на установившийся режим

Как видно из полученных зависимостей (рис. 5), 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 конфузальной 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 масляно-воздушную смесь в виде суспензии белого цвета. Объемная температура масла к концу серии испытаний повышалась на 4 °С.

Таким образом, использованием масляно-воздушной 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.

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 масляно-воздушную фазу суспензии.

2. Образование масляно-воздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению коэффициента сжатия и растяжения исходно жидкой смазочной среды. Уменьшение сил сжатия смазочных слоёв в конфузальной 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.

1. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
2. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
3. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, – 1977. – 526 с.
4. *Коднир Д.С.* Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: М., 1976– 304 с.
5. *Ковеза Ю.В., Никитин С.В., Пшеничных С.И.* О решении тепловой задачи применительно к обычным и гибридным подшипникам качения газотурбинных двигателей. Ж. «Авиационно-космическая техника и технология», 2008, №10 (57). – С.132-135.
6. *Kenneth C Ludema, Arbor A.* Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology. – CRC Press, Inc. - Boca Raton, New York, London, Tokyo. – 1996. – 257 p.
7. *Демидович В.М.* Исследование теплового режима подшипников ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 172 с.
8. *Б.И. Костецкий* Трение, смазка и износ в машинах – «Техніка», 1970, 396 с.
9. *Стельмах А.У.* Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания – Деп. в ГНТБ Украины. – 07.07.2008, №109-Ук 2008.–28 с.
10. *Стельмах А.У.* Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. Нац. авиац. ун-т. – Киев, 2009.– Рус. Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009. – 43 с.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2013.