

УДК 621.891

© Р.Е. Костюник, к.т.н.

Национальный авиационный университет

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ АСК-01

В статье приводятся результаты трибологических исследований взаимодействия адгезионного изнашивания с динамическими процессами в граничных слоях смазки на машине трения АСК-01 при смазывании модельной пары трения горюче-смазочными материалами различных классов

АДГЕЗИЯ, ПРИБОР ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЕ, ТРИБО-СИСТЕМА, ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Постановка проблемы. Одной из актуальных проблем современной трибологии является повышение работоспособности трибосистем с граничным трением. Значимость этой проблемы возрастает, если учесть, что потери, связанные с изнашиванием узлов

трения, составляют до 5% ВВП промышленно-развитых стран. Развитие этого направления сдерживается недостаточностью знаний о сложных физико-химических, физико-механических и динамических процессах, протекающих при трении в условиях высоких нагрузочно-скоростных параметров в трибосистеме «твердое тело – смазочная среда – твердое тело».

Анализ последних исследований и публикаций. Существует два основных взаимоисключающих подхода к решению проблемы граничного трения. Первый, ЭГД (эластогидродинамический) подход, основан на динамических процессах в тонком смазочном слое, в котором возникает избыточное давление, отождествляемое с контактными напряжениями в рабочих поверхностях, хотя трибоконтакт имеет три характерные области по направлению движения: сужающаяся или конфузорная область (КО), переходная область (ПО) и расширяющаяся или диффузорная область (ДО). При этом смазочная среда рассматривается, как ньютоновская однородная жидкость. Этот подход разработан О. Рейнольдсом, Н.П. Петровым, А.И. Петрусевичем и др. [1, 2] в основном на уровне теоретических описаний, которыми предусматривается безызносность ЭГД-контакта, что противоречит эксперименту. При этом адгезионно-деформационные взаимодействия между поверхностями не рассматриваются.

Второй подход, основанный на адгезионно-деформационной теории граничной смазки, является признанным в современной трибологии, экспериментально подтвержденным и развитым в работах Крагельского И.В., Боудена Ф. и др. [3, 4], а также отечественным ученым Костецким Б.И. и его школой (Голего Н.Л., Аксенов А.Ф., Шевеля В.В., Запорожец В.В., Дмитриченко Н.Ф. и др.) [5–7]. В рамках этого подхода граничный слой рассматривается, как «третье тело», в котором давление, отождествляемое с герцевскими контактными напряжениями, всегда выше давления окружающей среды. При этом какие-либо динамические процессы в граничном слое не учитываются, что не позволяет объяснить наличие в нем кавитации и термоэффекта, описать кинетику адгезионно-деформационного взаимодействия поверхностей, определить условия и области его локализации, обосновать механизм образования и распределения продуктов изнашивания в контактной области и другие эффекты. Это ограничивает установление взаимосвязи неоднозначных сложных динамических процессов в граничных слоях с адгезионно-деформационным взаимодействием поверхностей, что не позволяет управлять трибологическим поведением трибоконтакта.

Цель исследования. Получить экспериментальные закономерности для подтверждения взаимосвязи процессов адгезионного изнашивания поверхностей трения с динамическими процессами в граничных слоях смазки.

Методика исследования. Исследование процессов трения в условиях граничной смазки потребовало использования специального оборудования, которое было разработано и изготовлено в лаборатории нанотриботехнологий НАУ в виде прибора трения скольжения с линейным контактом АСК-01 [8]. В приборе трения модель подшипника реализовывала плоская поверхность неподвижного образца (рис. 1, а), а модель вала – образец в виде цилиндрического ролика (диаметр – 33 мм, ширина рабочей поверхности образующей цилиндр – 3 мм). Материал пары трения – сталь ШХ-5, HRC 59...63.

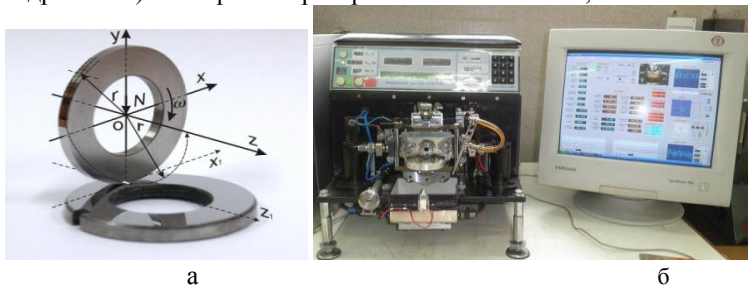


Рис. 1 – Схема модельной трибосистемы с постоянным мгновенным линейным контактом (а) и внешний вид машины трения АСК-01 (б)

В приборе АСК-01 (рис. 1, б) обеспечивается постоянство линейного мгновенного контакта и равномерность распределения контактных напряжений благодаря использованию системы самоустанавливания контакта (рис. 1, а). Это достигнуто тем, что оси вращения модельного подшипника OZ и OX пересекают ось вращения модельного вала OZ в его центре масс по оси действия осевой нагрузки OY.

Для обеспечения корректности измерений проведенных трибологических исследований использовался разработанный и изготовленный лазерный сканирующий дифференциально-фазовый микроскоп-профилометр ЛСДФМП с чувствительностью по профилю 1нм [9], а также растровый электронный микроскоп РЭМ-106И.

В качестве испытуемых сред использовали горяче-смазочные материалы различных классов: авиакеросины (ТС-1, РТ), моторные минеральные (МС-20, ГАЛОЛ М-4042, МК-8) синтетические масла

(диалкилбензоліе, ИПМ-10) вакуумні масла (ВМ-6, ВМ-4), гідравлічні масла (АМГ-10, ИПП 18), холодильне масло ХФ 12-16 і др. Трибологічні випробування проводились в широкому діапазоні навантажочно-швидкісних параметрів. Початкові контактні напруження створювалися для низькомолекулярних вуглеводородних серед - 1000 МПа, а для масел від 2000 до 2500 МПа. Лінійна швидкість скользяння варіювалася від 0,04 м/с до 2м/с. Шероховатість робочих поверхностей модельних вала і плоского підшипника створювалася шляхом їх послідовного полірування алмазними пастами до рівня параметра $Ra < 20$ нм, що контролювалося ЛСДФМП. Вимірювання профілів износа дорожок тріння вироблялися контактним профілографом-профілометром «Калібр М201» і бесконтактним ЛСДФМП.

Результати досліджень. На рис. 2-3 представлені експериментальні закономірності изнашивания і адгезійного взаємодіяння поверхностей після тріння симетричної системи, які не мають однозначного пояснення з позицій відомих теорій трибології.

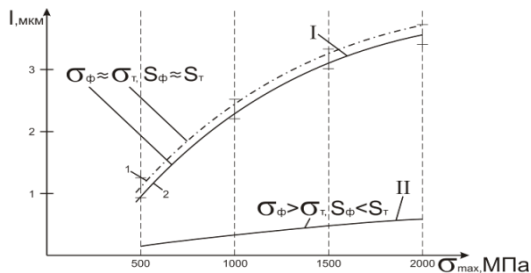


Рис. 2 – Зависимость износа I от от начальных максимальных контактных напряжений σ_{max} (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная) при разных мгновенных фактических контактных напряжениях σ_{ϕ} относительно теоретических σ_{τ} с учетом фактической площади контакта S_{ϕ} и теоретической S_{τ} . Скорость скользяння 0,3 м/с

Однако эти закономірности могут быть описаны с позиций упорядоченных микротечений упругодеформированных граничных слоев смазки, обуславливающих градиенты давлений в конфузурной и диффузурной областях трибоконтакта [10].

На рис. 2 представлены изменения износа от осевой нагрузки модельной трибосистемы скользяння при реализации постоянного (I)

и подвижного контакта (II). В первом случае фактическая мгновенная площадь контакта приблизительно соответствует теоретической и сам контакт при вращении модельного вала практически не нарушается.

Представленная зависимость (I) соответствует традиционным представлениям об увеличении износа с ростом контактных напряжений (пунктир I). Однако при подвижном контакте, вызванном осевыми отклонениями поверхности образующей цилиндр модельного вала, фактическая площадь контакта при постоянной нагрузке существенно (в разы) меньше теоретической. Следовательно, мгновенные напряжения поверхностей – больше расчетных, что объясняется осевой подвижностью контактирующих участков в пределах контурной площади. При этом интенсивность изнашивания существенно уменьшается (II). После реализации полного контакта на приборе АСК-01, когда мгновенная площадь контакта близка к теоретической и фактические контактные напряжения существенно меньше, чем в предыдущем случае, интенсивность изнашивания при прочих равных условиях нагружения возрастала, несмотря на меньшие значения фактических контактных напряжений, обеспечиваемых системой самоцентрирования (рис. 1, а). Увеличение износостойкости при повышении мгновенных контактных напряжений (рис. 2, II) можно объяснить динамическими процессами в граничных слоях, а именно, их торцевыми микроперетеканиями из реверсивно смещающейся конфузорной области в диффузорную в осевом направлении. Эта закономерность справедлива для масел различных классов и особенно ярко проявляется в синтетических маслах (ИПМ-10).

Рабочая поверхность трения в контактной диффузорной области характеризуются признаками адгезии (вырывы, каверны, кратеры, рис. 3, а), которые всегда отсутствуют в конфузорной области. Профилограммы дорожек износа (рис. 3, б) носят явно асимметричный характер относительно оси пересечения максимальной глубины профиля, перпендикулярной плоской поверхности. Симметрия профилей (рис. 3, б) нарушается вследствие адгезионного разрушения поверхности подшипника в диффузорной области (ДО) контакта. Адгезионное взаимодействие поверхностей в диффузорной области трибоконтакта может быть вызвано понижением в граничных слоях давления ниже давления окружающей среды. Такое разрежение в граничных слоях приводит к их десорбции и дополнительному сжатию поверхностей, инициируя их схватывание.

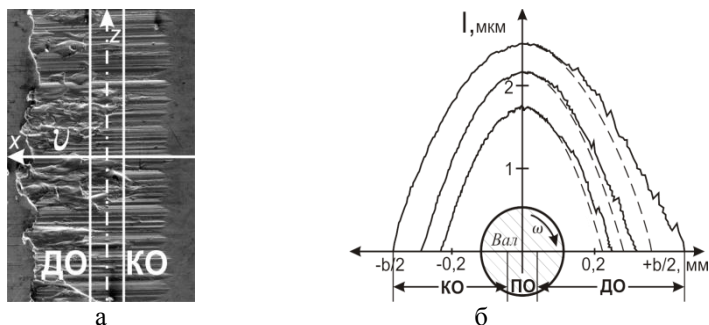


Рис. 3 – Адгезионное взаимодействие материалов поверхностей в диффузорной области (а) и асимметрия профилей изношенных дорожек скольжения (б)

На рис. 3, б показана фактическая асимметрия профилограмм дорожек скольжения, образованных на поверхности модельного подшипника после трения теоретически симметричного линейного трибоконтакта. Нарушение симметрии связано с образованием адгезионных локальных взаимодействий, в виде всплесков величины износа в диффузорной области контакта.

Полученные экспериментальные закономерности подтверждают предложенную гипотезу о взаимосвязи процессов адгезионного изнашивания поверхностей трения с возникающими динамическими процессами в граничных слоях смазки.

На основе полученных экспериментальных эффектов, которые не имеют своего однозначного объяснения с позиций известных теорий трибологии и наблюдений за течениями, возникающими в контактной области, выдвинута гипотеза о протекании в трибоконтакте скольжения двух разнознаковых процессов в граничных смазочных слоях.

Выводы

1. Повышение износостойкости трибосистем с ростом мгновенных контактных напряжений, асимметрия изношенных дорожек скольжения, возникновение первичных узлов адгезионного взаимодействия в ДО и оседание продуктов изнашивания в области, близкой к КО, может быть результатом возникновения контактных микротечений граничных слоев.

2. Установлено, что первичное адгезионное взаимодействие поверхностей трения возникает в диффузорной области трибоконтакта. Исследован десорбционно-адгезионный механизм изнашивания при

трении в условиях граничной смазки, заключающийся в адгезии поверхностей в диффузорной области (ДО) контакта, вырывом и поступлении вместе с валом первичных частиц износа в конфузорную область (КО), которые осуществляют микрорезание поверхности в этой области с последующим скалыванием вершин адгезионных «наростов», переходящих в продукты износа.

Литература

1. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости. Инж. журн., т. 27, №1, №2, 227; №3, 337; №4, 535, 1883. Отдельное издание, СПб, 1881. – 212 с.
2. Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. – Известия АН СССР, ОТН, 1951, №2. – С. 209–216.
3. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
4. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
5. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М.; К: Машгиз, 1950. – 168 с.
6. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости: монография / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
7. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
8. Стельмах А.У. Способ определения противоизносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления / Кияшко С.Н., Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Терновая Т.В., Сидоренко А.Ю. // Патент РФ на изобретение № 2279660. Заявлено 30.09.04; опубл. 10.07.06. Бюл. № 19.– 10 с.
9. Способ дифференциально-фазовой профилометрии и/или профилографии и устройство для его реализации / Кияшко С.Н., Смирнов Е.Н., Ильченко Л.Н., Коленов С.А., Стельмах А.У. // Патент на изобретение №2001116525. – 2001.
10. Стельмах О.У. Компресійно-вакуумна складова сили тертя в умовах граничного змащування // Вісник НАУ. – 2008. – №4. – С. 50–57.

Рецензент д.т.н., проф. Е.А. Налобина