

The global use of cobalt in 2009 was as follows [11,12]: lithium batteries – 25 %, superalloys – 20 %, hard materials – 18 %, catalysts – 10 %, other applications – 27 %. The demand for cobalt will remain high, especially for applications in electric batteries. Lithium batteries, used in hybrid electric vehicles, contain large amounts of cobalt. Signalled by large automotive companies (Hitachi, General Motors, Honda) [11,12], the increase of production of hybrid vehicles will be an additional factor forcing the price of cobalt in the future.

Considering the above, it should be stated that it is appropriate to seek new materials for the matrix of diamond impregnated tools to free the production of those tools from cobalt.

References

1. Konstanty J.: Powder Metallurgy Diamond Tools, Elsevier, Oxford, 2005.
2. Konstanty J.: Producton and Applications of PM Diamond Tools, International Powder Metallurgy Directory, 12/2006.
3. Lachowski J., Borowiecka-Jamrozek J., Modelowanie komputerowe retencji i pracy cząstki diamentu w osnowie kobaltu, Sympozjum Terotechnologie, Kielce, wrzesień 2005, str. 29-37.
4. Borowiecka-Jamrozek J., Lachowski J., Własności mechaniczne, termiczne i atomowe kobaltu – osnovy narzędzi metaliczno-diamantowych, Sympozjum Terotechnologie, Kielce, wrzesień 2005, str. 39-46.
5. Romański A., Lachowski J., Konstanty J., Diamond retention capacity – evaluation of stress field generated in a matrix by a diamond crystal, Industrial Diamond Review, Vol. 66, No. 3, 2006, pp. 43-45.
6. Romański A., Lachowski J., Modelowanie stanu naprężeń i odkształceń w spiekanych materiałach narzędziowych metaliczno-diamantowych, Rudy i metale nieżelazne, R52, nr 7, 2007, str. 402-409.
7. Lachowski J., Romański A., Modelowanie retencji i pracy cząstki diamentu w osnowie metalicznej, I Kongres Mechaniki Polskiej, Warszawa, 28-31.08.2007, stron 8.
8. Romański A., Lachowski J., Frydrych H., Is energy of plastic deformation a good estimator of the retentive properties of metal matrix in diamond impregnated tools? 2nd International Industrial Diamond Conference, 19-20th April 2007, Rome, Italy.
9. US Department of Interior, US Geological Survey // <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diamond>.
10. US Department of Interior, US Geological Survey; URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt>.
11. World Mineral Production 2005-09, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, 2011; URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk>
12. Cobalt Development Institute; URL: <http://www.thecdi.com>
13. www.en.wikipedia.org, access 10mar2011.
14. Romanski A., Lachowski J., Effect of friction coefficient and mechanical properties of the matrix on its diamond retention capabilities, 5th International Powder Metallurgy Conference, October 8-12, 2008, Ankara, Turkey, pp. 298-307.

Надійшла 4.11.2011 р.
Рецензент: д.т.н. Шалапко Ю.І.

УДК 621.891

А.У. СТЕЛЬМАХ
Национальный авиационный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ СМАЗКИ В ТРИБОКОНТАКТЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований поведения граничных слоев смазочных материалов в трибоконтакте скольжения. Полученные результаты подтверждают гипотезу о динамических процессах в граничных слоях и десорбционно-адгезионном механизме изнашивания, что позволяет по-новому подойти к решению проблем трибологии граничной смазки контакта скольжения.

Results of experimental researches of behavior of boundary layers of lubricants in tribocontact sliding are presented. The received results confirm a hypothesis about dynamic processes in boundary layers and the desorption-adhesive mechanism of wear process that allows to approach in a new fashion to the decision of problems tribology of friction of greasing of contact of sliding.

Ключевые слова: трибосистема, скольжение, линейный контакт, конфузорная область, диффузорная область, разрежение, трибокавитация, вторичные течения.

Введение

Основу трех базовых разделов современной трибологии составляют следующие гипотезы и представления о природе трения [1– 7], составляющие основу их классификации:

1. Бесконтактное и практически безыносное гидродинамическое трение в подшипниках скольжения описывается известной теорией смазки [1– 3]. Для этого режима характерны значения

коэффициентов трения скольжения 0,010– 0,001, а иногда и 0,0001. При этом силу трения в паре «вал-подшипник» описывают зависимостью:

$$F = \frac{huS}{e + \frac{h}{I_1} + \frac{h}{I_2}}, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности трения, v – линейная скорость вращения вала, η – вязкость смазочной среды, e – зазор между валом и подшипником, λ_1 и λ_2 – коэффициенты внешнего трения. Полагая, что λ_1 и λ_2 на границах смазочная плёнка – поверхности вала и подшипника значительно больше η , зависимость (1) принимает вид:

$$F = \frac{huS}{e}, \quad (2)$$

Выражение (2) широко используется в расчетах подшипников скольжения, работающих при больших скоростях и малых нагрузках, где не учтена осевая нагрузка, а также влияние течений граничных слоёв, вызванных градиентом давлений в контакте. При увеличении силы сжатия поверхностей трибосистема переходит в более нагруженный режим контактно-гидродинамического трения.

2. Контактное и теоретически безыносное эластогидродинамическое трение объясняют с позиций контактной гидродинамики [4– 6] с учетом гидродинамических и упруго-деформационных сил взаимодействия среды и поверхностей трибоконтакта, что позволяет силу трения и другие параметры трибосистем. На практике коэффициент трения в типовых трибосистемах на один-два порядка больше расчетных и его значение достигает 0,01-0,10, что характерно для 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.

3. Трение в условиях граничной смазки, сопровождающееся интенсивным изнашиванием поверхностей, аргументировано постулатами адгезионно-деформационной теории [7– 8], в соответствии с которыми макросилу трения ($F_{тр}$) образуют механическая (деформационная – $F_{деф}$) и молекулярная – (адгезионная – $F_{адз}$) компоненты:

$$F_{тр} = F_{деф} + F_{адз} \quad (3)$$

Исследования соотношения адгезионной и деформационной составляющих силы трения показали, что в условиях граничной смазки значение $F_{адз} / F_{деф}$ [7] достигает 10000, а по данным [8] ~ 100. Поэтому считается, что доминирующим при трении в условиях граничной смазки является взаимодействие рабочих поверхностей на молекулярном уровне. Изнашивание материала поверхностей трения, как известно, является следствием их адгезионного взаимодействия (образования и разрушения «мостиков сварки» [8]), поэтому режим трения в условиях граничной смазки может рассматриваться, как процесс трибоадгезии. При этом контактные гидродинамические течения граничных слоёв смазки, которые оказывают дополнительное сопротивление движению, не учитывается. Полагается, что граничные слои смазки между сжатыми поверхностями твёрдых тел образуют некое «третье тело», имеющее свойства стеклоподобной субстанции [6, 7].

Фундаментальные исследования пристенных слоёв смазочной среды показали [9], что они являются гомеотропными эпитропными жидкокристаллическими (ЭЖК) слоями смазки. В работе [10] представлены экспериментальные данные об ЭЖК – слоях ряда жидкостей, показывающие, что их вязкость превышает объёмную, а измеренная равновесная толщина составляет от 20 нм до микрометров.

Анализируя современное состояние трибологии, автор работы [11] подчеркивает, что «ввиду сложности процессов, формирующих трение, в настоящее время нет пока единого мнения о его природе». На сегодняшний день трение и изнашивание рассматриваются с позиций разрозненных представлений об их природе.

Теоретические разработки в трибологии, результаты которых могли бы стать общими положениями, пока отсутствуют, а экспериментальные исследования дают новые результаты [12], которые в ряде случаев не имеют объяснений с позиций известных теоретических представлений. Так, при трении скольжения поверхностей твёрдых тел трибосистем с линейным контактом не находит объяснения образование следов трибоадгезии материала в виде вырывов, каверн и кратеров, которое, как правило, наблюдается в подшипнике или образце в области выхода вала из контакта, а в области его входа в контакт образуются лишь риски в виде царапин. При этом не находит объяснение скапливание продуктов износа, в основном, в области входа вала в контакт на незначительном удалении от него.

Обнаруживается противоречие: при кратковременном трении скольжения полированных стальных поверхностей коэффициент трения достигает значений 0,15, что свидетельствует о возникновении в контакте адгезионной составляющей силы трения, которая, исходя из молекулярно-деформационной теории, на два порядка больше других слагаемых, а основной признак действия адгезионной составляющей силы трения – изнашивание практически отсутствует. При этом даже признаки повреждения поверхностей трения не обнаруживаются. Следовательно, утверждение, что адгезионная составляющая макросилы трения является преобладающей (99 % от всех потерь на трение в условиях граничной смазки), вызывает сомнения.

Результаты экспериментов и теоретические положения современной трибологии зачастую входят в противоречие. Поэтому во всем мире продолжается разработка новых гипотез и положений, устраняющих

недостатки существующих представлений о природе трения.

Постановка задачи

Выдвинутая в 2008 г. гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения [12, 13], в которой установлено наличие закономерных динамических процессов в граничных слоях смазки, а именно возвратные и деформации сжатия в конфузорной области контакта, и растяжение (разрежение) – в диффузорной. Эта гипотеза нашла свое первичное экспериментальное подтверждение и требует более глубокого изучения, что является целью данной статьи. Для этого были разработаны и использованы оригинальные лабораторные машины трения одностороннего скольжения с оптически прозрачным линейным контактом (рис. 1).

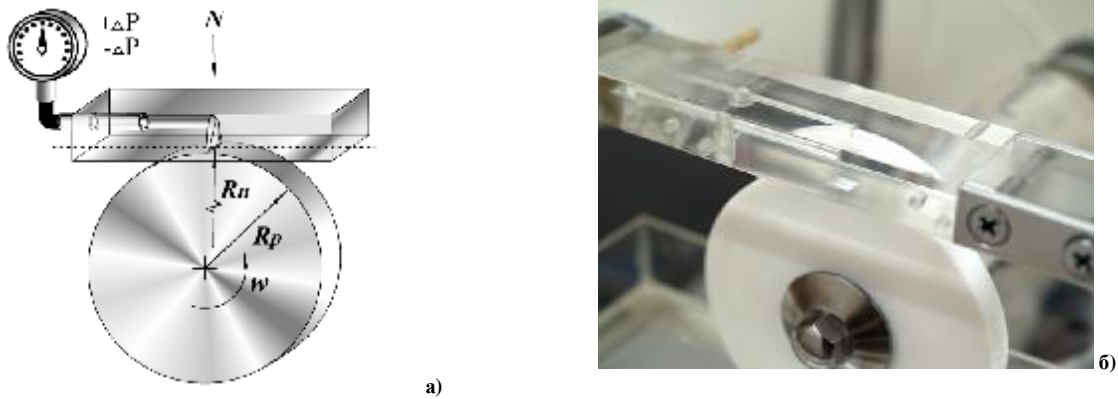


Рис. 1. Машина трения скольжения с верхним положением контакта: схема (а); трибузел (б)

Конструкция стенда. В качестве вращающегося образца, моделирующего вал, использовался фторопластовый ролик (наружный диаметр – 80 мм, ширина ролика – 9 мм), а плоский неподвижный параллелепипед, моделирующий подшипник скольжения, то есть контртело, был изготовлен из оптически прозрачного материала (неориентированное органическое стекло).

В среде атмосферного воздуха рабочая поверхность, образующая цилиндр ролика, при сжатии вступает в контакт с плоской поверхностью прозрачного параллелепипеда, что визуализирует площадку контакта в форме узкого прямоугольника. Протяженность такого контакта соответствует ширине ролика 9 мм, а его ширина при осевой силе сжатия 4 Н составляет 0,7 мм, и при 40 Н ~ 0,8 мм. В качестве основной модельной смазочной среды использовался авиационный керосин ТС-1 – прозрачная, маловязкая жидкость, исключая при малых скоростях скольжения (0,2...0,8 м/с) и малых нагрузках (1...10 Н) возникновение режима гидродинамического бесконтактного трения. Линейная скорость скольжения варьировалась с плавным изменением от 0,2 до 0,9 м/с, осевая нагрузка изменялась в диапазоне от 4 до 200 Н. После установления линейного контакта вокруг него образовывалось симметричное относительно линии контакта пятно керосина за счет смачивания им поверхностей (рис. 1). В первоначальных экспериментах [12] шероховатость рабочей поверхности ролика принималась $R_a < 20$ нм. В дальнейших исследованиях [13], ввиду не принципиального влияния шероховатости на изучаемые процессы, использовались образцы с большими неровностями ($R_a < 0,8$ мкм), что существенно легче реализовать на практике.

Результаты исследований

Визуализация процессов в контактной зоне. Наблюдение за поведением слоёв керосина, вносимых роликом в зону контакта, при трении о нижнюю грань прозрачного контртела, производилось через его боковую и верхнюю грани при определённом освещении (рис. 2).

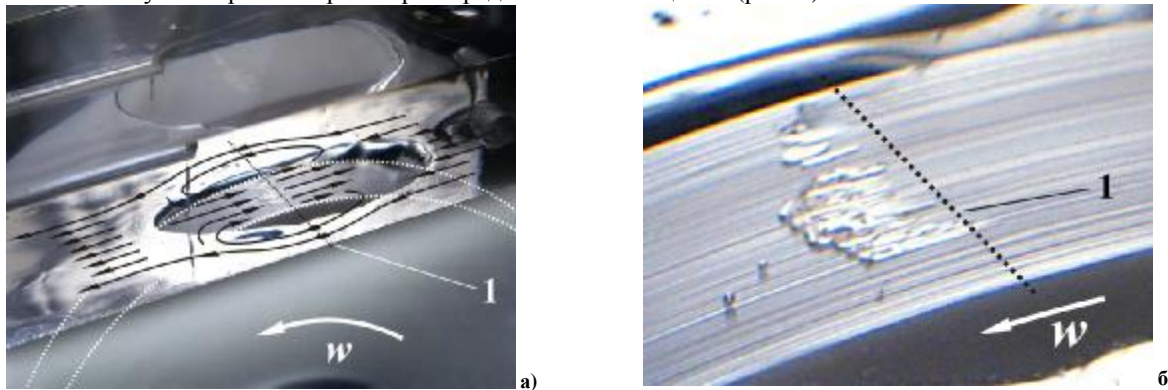


Рис. 2. Линии тока жидкости в контактной зоне при трении скольжения ролика по плоской грани контртела (а) и образование кавитационных полостей и пузырьков в диффузорной области линейного контакта «ролик-контртело» (б) (1 – средняя линия контакта поверхностей)

Как видно из рис. 2, слои керосина увлекаются роликом в зону контакта и частично обтекают её по краям. На поверхности контртела макропотоки смыкаются за контактом. При этом всё пятно смачивания смещается в сторону, обратную направлению скольжения. После установившейся скорости вращения, при

подсветке зоны контакта под определённым углом, наблюдается непрерывное интенсивное струйное истечение керосина из зоны контакта в направлении, обратном вращению.

На выходе ролика из контакта визуально наблюдается непрерывное интенсивное течение керосина в направлении контакта, то есть также в направлении, обратном скольжению. Линии тока керосина, наблюдаемые при скольжении, показаны на рис. 2, а.

Увеличение скорости скольжения ролика по поверхности параллелепипеда приводит к большему смещению контактного пятна керосина в сторону, обратную направлению вращения. Наблюдаемые при этом неоднородности течения керосина «из контакта» в области входа ролика в контакт и «в контакт» в области выхода ролика из контакта становятся более заметными. То же происходит и при увеличении нагрузки при постоянной скорости скольжения. При плавном возрастании скорости скольжения до 0,3 м/с в зоне выхода ролика из контакта в слоях керосина наблюдается появление газовых пузырьков, которые, перемещаясь в направлении скольжения, выносятся движущейся поверхностью образующей ролика на расстояние 5 мм от контактного участка и затем исчезали. Движение образующихся газовых пузырьков (рис. 2, б) около контакта происходило в направлении скольжения, но против струйного течения керосина, направленного обратно – «в контакт». Пузырьки зарождаются беспорядочно по всей ширине линейного контакта в системе «ролик-контртело» вследствие кавитации керосина. Для керосина ТС-1 при температуре 20 °С давление паров, находящихся в состоянии динамического равновесия с жидкой фазой, 919,9 Па при отношении объёма жидкости к объёму пара 4: 1. Следовательно, разрежение в зоне выхода ролика из контакта, уже при скорости 0,3 м/с и осевой нагрузке 4 Н, существенно и в этой области происходит вакуумирование граничных слоёв до давления 919,9 Па. Дальнейшее увеличение скорости скольжения приводит к интенсификации возникновения пузырьков, последующему их слиянию и возникновению парогазовых полостей. Последние, осциллируя в направлении скольжения, имеют вытянутую форму, похожую на «языки пламени» (рис. 2, б) с основанием у середины области контакта.

При изменении направления скольжения потоки керосина в зоне контакта также изменяют своё направление в противоположную скольжению сторону. Изменение направления скольжения вызывает практически симметричное изменение направления контактных течений среды.

Определение распределения давления в контакте. Для исследования распределения давления в контактной области внутри контртела были проделаны каналы с выходом на контактирующей поверхности в виде отверстий или щели, являющихся зондом измерителя давления в смазочном слое. К боковой грани контртела через штуцер подключен манометр измерения давления в контактной и околоконтактной областях. Предусмотрено сканирование контакта соответствующим зондом.

Измерение давления в слое керосина производилось в средней части контактной зоны по нормали к его средней линии с помощью резистивных датчиков давления МДД-ТЕ 0-1. Шаг зондирования в плоскости контактной зоны – 0,05 мм.

Результаты измерений (рис. 3 а) показали, что давление керосина в области входа ролика в контакт начинает возрастать за 2 мм до начала контакта контртела с вращающимся роликом. У передней кромки контакта на входе, достигнув максимума более 1000 мм водного столба, давление стремительно падает и вблизи середины контакта снижается до атмосферного. Далее в зоне выхода ролика из контакта имеет место разрежение с экстремальным давлением ниже атмосферного (около 1000 мм водного столба), и также на самом краю контакта, в области выхода ролика. На расстоянии около 2 мм от контакта давление керосина плавно повышается и выравнивается до атмосферного.

Аналогичные измерения, проведенные при прочих равных условиях, но в противоположном направлении скольжения (рис. 3, б), дали практически симметричную инверсию параметров, что свидетельствует о закономерной связи контактных течений граничных слоёв с направлением скольжения. То есть, на входе в контакт происходило повышение давления керосина, а на выходе из него – понижение относительно атмосферного.

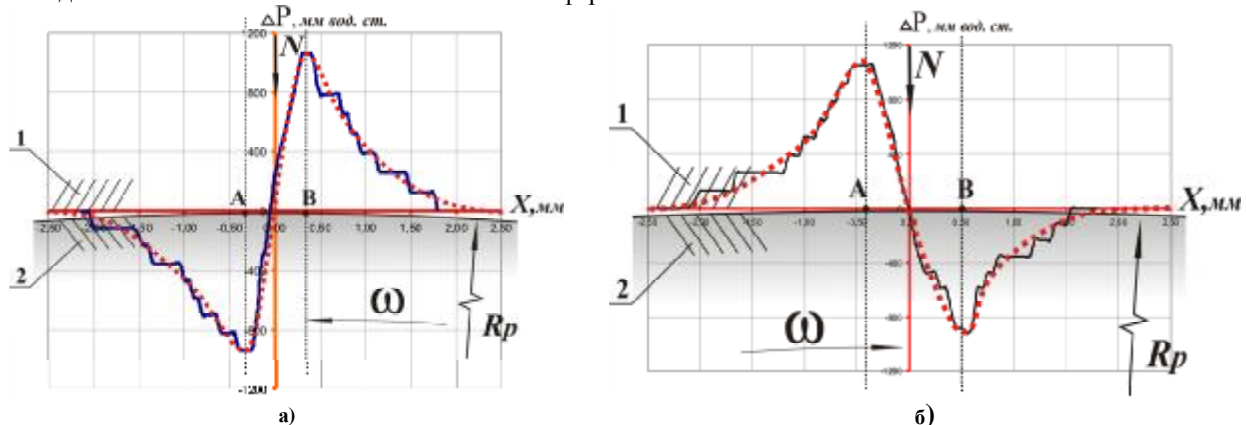


Рис. 3. Распределение перепада давления в граничных слоях керосина ТС-1 относительно атмосферного ΔP , то есть разница между измеренным и атмосферным давлением по координате сканирования X перпендикулярно контакту при скольжении, где [AB] – ширина линейного контакта контртела 1 и ролика 2 с радиусом R_p ; ω – частота вращения; N – осевая сила сжатия; X – координаты сканирования; а) вращение по часовой стрелке; б) вращение против часовой стрелки

Перемена направления скольжения, при прочих равных условиях, сопровождается изменением знака перепада давления граничных слоев керосина ΔP , который по величине практически не изменяется относительно середины контакта системы «ролик-контртелло» (рис. 3,б). Визуально наблюдаемые линии тока также изменяют свои направления в противоположную сторону. В области входа ролика в контакт с контртеллом давление керосина увеличивается и у самой кромки контакта достигает своего максимума, а в средней части – резко уменьшается, до атмосферного. Затем, в области выхода ролика из контакта, также скачкообразно происходит понижение давления сканируемых слоев керосина до минимума, и также, по мере удаления зонда от него, начинается плавное повышение измеряемого давления до давления окружающей среды. Показанное выше понижение давления среды, происходящее в диффузорной области контакта трибосистемы скольжения, может достигать значений давления насыщенных паров, что приведёт к частичной или полной деструкции граничных слоёв смазки в пристенных граничных слоях. Такая деструкция граничных слоёв в условиях сильного понижения давления в них, вероятно, и есть основной причиной образования участков практически сухого трения, что приводит к возникновению «мостиков схватывания» поверхностей трения. Можно предположить, что молекулярная или адгезионная составляющая силы трения (99 % от суммарной силы трения), возникающая на трибоконтакте с граничной смазкой, является следствием понижения давления среды между поверхностями, движущимися в направлении диффузорной части контактной зоны. При исключении разрежения давления среды между поверхностями трения в условиях граничной смазки трибосистема скольжения становится практически безыносной.

Контактные и бесконтактные вторичные течения и распределение давления в граничных слоях среды (рис. 3) наблюдались в воде, в средах авиакеросина ТС-1, диалкилбензольного масла, вакуумного масла ВМ-6, в моторных, трансмиссионных и других технических маслах [13]. В качестве примера на рис. 4 представлены зависимости распределения давления в граничных слоях диалкилбензольного масла при разных скоростях скольжения. В области входа ролика в контакт А, с увеличением линейных скоростей скольжения (от 0,2 до 0,8 м/с), сила трения возрастает и повышение давления слоя масла также увеличивается, а максимум его достигает одной атмосферы, то есть на порядок больше, чем в среде керосина. Заметим, что и вязкость этого масла также на порядок больше, чем у керосина. При постоянной линейной скорости ролика 0,86 м/с и увеличении осевой нагрузки в 2,5 раза (с 4 до 10 Н) сила трения увеличивается и давление в керосине, в конфузурной области контакта, возрастает с 1400 до 3700 мм вод. ст., то есть также ~ в 2,5 раза. Сила трения скольжения возрастает пропорционально с увеличением избыточного давления среды в конфузурной области контакта по направлению движения вала, которое, в свою очередь, растет с увеличением вязкости среды, осевой нагрузки и линейной скорости скольжения. Следовательно, сила трения скольжения является интегральным результатом процессов, протекающих в граничных слоях смазки в конфузурно-диффузорных полостях контакта.

При этом в диффузорной области контакта В (рис. 4), т.е. в области понижения давления, характер распределения давления существенно отклоняется от симметричного (пунктир), как это имело место в керосине (рис. 3). Объясняется это особенностями поведения жидкостей в условиях пониженного относительно окружающей среды давления, когда она вскипает и переходит в двухфазное состояние, а также несовершенством техники измерений в рассматриваемых экспериментах.

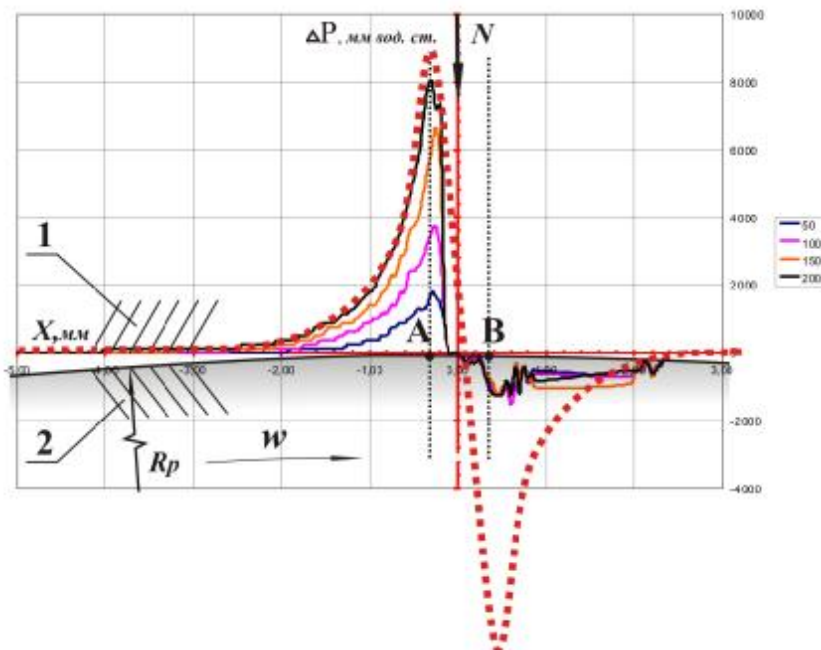


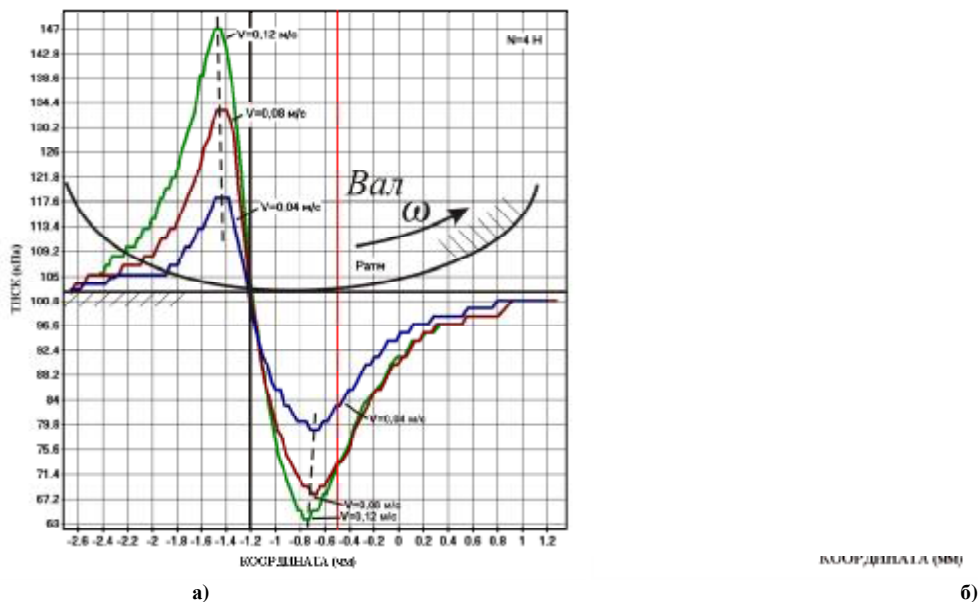
Рис. 4. Зависимость распределения перепадов давления ΔP в граничных слоях диалкилбензольного масла при разных скоростях скольжения, где [AB] – ширина линейного контакта контртела 1 и ролика 2 на воздухе. В области входа ролика в контакт А максимум избыточного давления увеличивается с увеличением линейной скорости скольжения (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 м/с)

Распределение давления в граничных слоях (масло ИПМ-10) при различных нагрузочно-скоростных параметрах (рис. 5) показывает повышение интенсивности динамических процессов как в конфузурной, так и в диффузорной областях трибоконтакта скольжения с увеличением линейной скорости v и осевой

нагрузки N . При осевой нагрузке 2 Н, линейной скорости 0,02 м/с и площади контакта 4 мм² степень разрезания достигала 50 кПа.

Анализ зависимостей (рис. 5) показывает, что величина осевой нагрузки и скорости скольжения трибоконтакта полностью определяют интенсивность ДПГС, то есть вторичных течений, которые в свою очередь приводят к возникновению разно-полярных градиентов давления по обе стороны контакта. На рис. 6 показана схема возникновения вторичных течений граничных слоев смазки в конфузурных и диффузорных областях при трении скольжения вала 1 по модельному плоскому подшипнику 2 в упругодеформированных участках АОВ и в бесконтактных зонах FАС и ВЕD. При скорости набегающих с валом граничных слоев v_l в конфузурной области FА возникает обратное движению вала гидродинамическое течение v_{20} и на участке АО – контактно-гидродинамическое течение $v_{конт}$. Трение этих течений с фрагментами граничных слоев, набегающих с валом, приводит к увеличению давления в конфузурной области контакта. На диффузорном контактно-гидродинамическом участке ОВ происходит понижение давления упругодеформированных и, следовательно, с минимальным количеством фрагментов ЭЖК-слоев, прошедших область максимальных напряжений $ОО_1$. Поэтому под действием давления окружающей среды в зазор на участке ОВ будут стремиться фрагменты смазки из кромки диффузорного зазора ВВ₁ со скоростью $v_{конт}$. Также под действием давления окружающей среды в области DВE возникает гидродинамическое течение со скоростью v_{20} из объема смазки в контакт.

На основе полученных экспериментальных результатов исследований и выдвинутой гипотезы компрессионно-вакуумной природы трения [12, 13] контактные процессы, протекающие при трении подшипника скольжения в среде, представляются следующими. При медленном сближении вращающегося ролика с неподвижной поверхностью плоского контртела, в момент образования механического контакта, происходит резкое повышение силы трения и давления в конфузурной зоне, а также понижение давления в диффузорной области контакта.



а) б)
Рис. 5. Распределение давления в контактной и околоконтактной областях:
а – $V=0,044$ м/с, $N = 1Н; 2Н; 3Н; 4Н; 5Н; 6 Н$; б – $N = 2 Н$ и $V = 0,04; 0,08$ и $0,12$ м/с

При этом разрушение контактных поверхностей не происходит – в момент образования упругого трибоконтакта резкое повышение силы трения вызвано скачкообразным повышением величины избыточного давления у самой кромки контакта в конфузурной области и симметричным понижением – в диффузорной. Визуально наблюдается также скачкообразное ускорение потоков среды (по направлению вращения): из зоны на входе ролика в контактную область из нее – в зону выхода ролика. Указанное объясняется тем, что при упругом деформировании поверхностей трения, разделённых граничными слоями смазки, в конфузурном участке контактной области по направлению вращения ролика СОF происходит упруго-контактное сжатие и ускорение вторичного течения граничных слоёв смазки в направлении, обратном движению ролика (рис. 6). Такое ускорение вызвано положительным градиентом давления в смазочном слое от атмосферного до величины максимального контактного давления, которое соответствует максимальным контактным напряжениям на поверхностях элементов трибопары. За областью максимальных напряжений $ОО_1$ в диффузорном участке выхода ролика из контакта ОDE происходит упруго-контактное расширение обеднённых граничных слоёв предшествующим выдавливанием на участке СОF и ускоренное вторичное течение молекул жидкости из объёма среды в контакт.

Перед входом вала в контакт (рис. 6) в области CFAC, то есть в конфузурной части контакта граничных слоёв 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 ролика слоёв смазки, которые движутся вместе с ним в направлении контактной зоны с максимальной скоростью, равной линейной скорости скольжения $\vec{U}_л$ вращающейся поверхности образующей цилиндр ролика. Вторичное гидродинамическое течение, обратное движению ролика, возникает на значительном расстоянии до контактной зоны. Оно образуется под действием упругих деформаций граничных слоёв, то есть сжатия в конфузурной прикортактной области СФАС, вызванного геометрическим сужением канала, направлено в сторону, обратную движению ролика со скоростью $\vec{U}_{сж}$. Экспериментально это наблюдается и фиксируется с помощью измерительного зонда давления при вращении вала вблизи плоской поверхности контртела как в жидкой, так и в газообразной среде.

При приложении осевой нагрузки N к вращающемуся валу, возникает механический упругий контакт АВ с граничными слоями среды между сжимаемыми поверхностями (рис. 6).

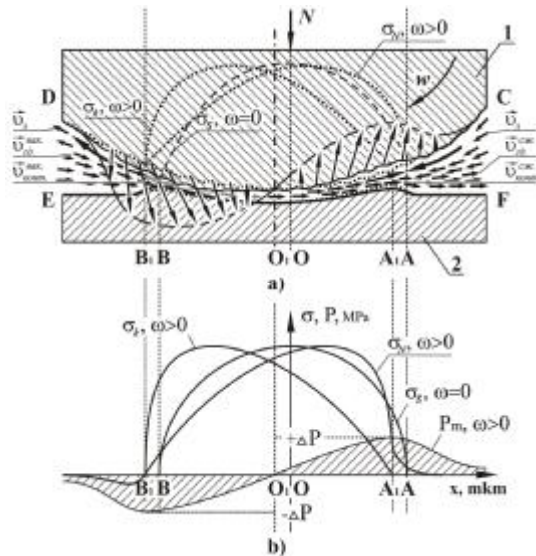


Рис. 6. Схема образования контактных встречных компрессионных и вакуумных течений граничных слоёв смазки:

- а) в трибосистеме скольжения «ролик 1 – контртело 2», направленных обратного скольжению, и смещение неподвижного контакта АОВ в направлении скольжения в зону А₁О₁В₁; б) распределение контактных напряжений на 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_s при трении ($\omega>0$); суммарное поле реактивных напряжений, действующих нормально только на поверхность движущегося ролика σ_R при трении ($\omega>0$).

В конфузурной части контакта АО возникнет еще одно обратное течение граничных слоев среды из области минимального зазора OO_1 и, соответственно, максимального одноосного давления сжатия σ_{max} до кромки входа вала в контакт AA_1 , где давление превышает атмосферное на величину степени сжатия граничных слоёв в прикортактной конфузурной области СФАС. Это вторичное контактное течение реализуется принудительно, начинаясь от зоны входа ролика в контакт AA_1 , то есть от кромки касания деталей с граничными слоями среды, до зоны OO_1 с максимальными контактными напряжениями σ_{max} , то есть из области минимального зазора пристенных граничных слоёв смазки.

Отмеченные течения обратной компрессионной струи ОА и набегающих адсорбированных слоёв смазки СА у передней кромки контакта A_1A входят в столкновение. Происходит процесс, подобный известному в гидродинамике гидравлическому тарану, но в отличие от классического – однократного, гидротаран в рассматриваемом случае – непрерывный.

На выходе ролика из контакта по направлению скольжения в области BB_1 также возникают противоположные гидродинамические и контактно-гидродинамические течения, но с вакуумированием или растяжением граничных слоев. Адсорбированные слои на трущейся поверхности ролика с остаточными фрагментами смазки в минимальном зазоре движутся вместе с поверхностью ролика из области от минимального зазора OO_1 в область выхода из контакта BB_1 со скоростью $v_л$. Этот обеднённый предшествующим выдавливанием граничный слой оказывается в расширяющемся диффузорном канале, проходя путь от зоны OO_1 до BB_1 , где по пути движения происходит его разрежение, то есть вакуумирование. Вторичное диффузорное обратное течение формируется из среды, находящейся в объёме DBB_1E вблизи зазора BB_1 с давлением окружающей среды $P_{атм}$. У самой кромки выхода ролика из контакта с плоскостью BB_1 фрагменты среды устремляются из области B_1E в зону пониженного давления граничных слоёв BB_1 со скоростью $\vec{U}_{конт}^{вак}$, откуда поверхностью ролика выносятся разреженные фрагменты среды, которые, в свою очередь, пройдя путь от зоны OO_1 до BB_1 , под действием отрицательного градиента давлений оказались в диффузорном канале. Контактная «вакуумная» струя возникает из относительно покоящихся фрагментов среды, которые под воздействием атмосферного давления втекают в зазор тангенциально к поверхности ролика, выходящего из контакта с контртелом в зоне BB_1 . При этом сильноразреженный, возможно даже мономолекулярный слой смазки на ролике у самой кромки выхода из контакта, движется с поверхностью ролика в направлении скольжения по пути от зоны OO_1 до BB_1 , образуя второе течение среды. Эти два течения, где преимущественным является течение из объёма в зазор у выходной кромки контакта BB_1 , направлены практически тангенциально к поверхности вала. При встрече они приводят к понижению степени разрежения смазочных поверхностных слоёв в зоне BB_1 до давления окружающей среды. По сути, происходит нечто подобное процессу гидравлического тарана

адсорбированных и вакуумированных слоёв смазки – выходящего из контактной зоны рабочей поверхности ролика и перетекающего из среды в контактную зону. В отличие от эффекта классического гидротарана, для которого характерна однократность, в рассматриваемом случае происходит непрерывное столкновение разреженных фрагментов среды. Например, под действием высокого контактного градиента давлений ($\sigma_{max} - P_{атм}) = 1,1$ МПа на расстоянии полуширины контакта 0,4 мм возникает истечение фрагментов среды из контактной зоны со скоростью $\mathbf{u}_{конт}^{сж}$. Эта скорость по приблизительным расчетам для керосина при нагрузке 4 Н и скорости скольжения 1 м/с составляет 16 м/с. Если учесть, что скорость набегающих слоёв керосина ~ 1 м/с, то у кромки контакта происходит столкновение двух обратно направленных потоков среды с относительной скоростью 17 м/с. Этот эффект определяет силу трения скольжения, которая лавинообразно возникает при медленном нагружении контакта. Из представленного видно, что в поле высоких градиентов давления жидкокристаллические граничные слои смазки ведут себя, как жидкость.

Интенсивное уменьшение скорости вращения вала, сопровождающееся характерным изменением шума электроприводов при плавном создании контакта смазанных поверхностей путем медленного нагружения, наблюдается всегда. Это вызвано возникновением контактного упруго-деформационного истечения граничных слоёв смазки из контакта под действием возрастающего в направлении движения избыточного давления на входе в контакт. А на выходе из него течение среды из объёма в разреженные слои контактной диффузорной области происходит под действием атмосферного давления. Такое совместное воздействие этих течений на граничные слои трущейся поверхности в обратном вращении направлении ролика и является причиной его интенсивного торможения, а не действие адгезионной составляющей силы трения, так как при первичном контактировании признаки поверхностного схватывания не наблюдаются.

На рис. 6 ось ОО, проходящая через центр вращения ролика, по которой приложена сила сжатия N вала 1 и контртела 2, является геометрической осью симметрии контакта АВ, возникающего в статических условиях без движения ($\omega = 0$). При вращении вала ($\omega > 0$) возникают области повышенного давления на входе вала в контакт и разрежения среды – на его выходе из контакта. В этих областях создаются перепады давления (+ ΔP и - ΔP) относительно давления окружающей среды, поэтому основание эпюр контактных напряжений и напряжений сил трения смещается в сторону направления движения вала (влево на рис. 6). При этом контактные напряжения, развиваемые на поверхностях элементов трибопары σ_k при наличии силы сжатия N, будут представлять собой разницу контактных напряжений, возникающих в эпитропных слоях смазки и на поверхностях в статических условиях (без движения вала) σ_s , и перепадов давления ΔP , возникающих в слоях смазки при движении вала:

$$\sigma_k = \sigma_s - \Delta P \quad (4)$$

Таким образом, контактные напряжения σ_k при трении скольжения будут смещаться в сторону направления движения вала, то есть в область пониженного давления, как показано на рис. 5. Силы трения при этом будут определяться нормальной и тангенциальной проекциями развиваемых на поверхностях элементарных реакционных напряжений σ_N , которые в свою очередь представляют собой сумму контактных поверхностных напряжений σ_s и перепадов давления ΔP , возникающих в этих слоях при движении вала:

$$\sigma_N = \sigma_s + \Delta P \quad (5)$$

При этом основание эпюры A_1B_1 напряжений от действия сил трения σ_N совпадает с основанием A_1B_1 контактных напряжений σ_s , но сама эпюра будет наклонена в обратную вращению вала сторону, как показано на рис. 5.

Как видно из формул (4) и (5), в случае полного разделения поверхностей граничными слоями смазки контактные напряжения σ_k и напряжения от действия реакционных сил σ_N , возникающие симметрично на поверхностях трения, как вала, так и контртела, при проецировании их на вертикальную ось интегрально будут равны напряжениям, возникающим на рабочих поверхностях, когда те находятся в покое, уравновешивая действие внешней силы сжатия N. Эпюры контактных напряжений σ_k и напряжений воздействия реакционных сил σ_N наклонены в разные стороны. То есть, поверхности в области разрежения ЭЖК слоёв будут сильнее нагружены, чем в области повышенного давления. Учитывая всеобщий закон физики аддитивного сложения первичных сил, сила трения скольжения между валом и контртелом включает в себя следующие составляющие:

1) гидромеханическая составляющая силы трения или сила внутреннего трения, которая описывается соотношением Ньютона

$$f_{зм} = -h_{xy} \nabla u_y, \quad (6)$$

и связывает силу внутреннего трения F_x , действующую на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкой среды (газа, жидкости) с градиентом скорости ∇u_y посредством коэффициента динамической вязкости среды h_{xy} . То есть молекулярный слой смазки, движущийся со скоростью \mathbf{u}_d , преодолевает сопротивление относительно покоящихся слоев среды ($\mathbf{u}_\infty = 0$) тангенциальной деформации. Сила внутреннего трения, возникающая при движении тела в среде с неограниченным объёмом, то есть без каких-либо препятствий, во многом определяются высотой структурно-чувствительных граничных слоёв среды $h_{сч}$. Эта высота определяется расстоянием по нормали

от поверхности до тех слоёв среды, в которых движение практически не происходит. При этом учитывается форма тела, объёмная вязкость среды η_0 и скорости движения каждого фрагмента поверхности вала S_2 . Силы внутреннего трения, по сути, являются гидромеханическими силами, вызванными лишь сопротивлением среды деформации от движения в ней твёрдого тела;

2) гидродинамическая составляющая силы трения возникает даже при отсутствии непосредственного контакта, но при наличии вблизи движущейся поверхности вала некоторой поверхности, например неподвижной плоской поверхности или подшипника скольжения. Она возникает за счет торможения набегающих с валом граничных слоёв среды со скоростью $\mathbf{u}_л$, истекающих из конфузурного зазора и движущихся в обратную сторону относительно вызванных гидродинамической конфузурной деформацией сжатия течений со скоростью $\mathbf{u}_{20}^{сж}$. В диффузорной части зазора, по направлению движения поверхности, происходит скольжение выходящих из зазора разреженных граничных слоёв смазки по слоям смазки, втекающим в него со скоростью $\mathbf{u}_{20}^{вак}$ под действием внешнего давления окружающей среды;

3) контактно-гидродинамическая составляющая силы трения скольжения возникает от действия контактной нагрузки, вызывающей упругую деформацию граничных слоёв, связанной с высоким положительным градиентом давлений, возникающих в них от сжатия на уровне упругой деформации поверхностей на участке ОА (рис. 5). Такое деформационное воздействие на вносимые в контакт граничные слои среды приводит к их ускорению в конфузурной части контакта от сечения O_1O до кромки входа вала в контакт в сечении A_1A , где граничные слои поверхностей трения выходят из контактного взаимодействия, а скорость $\mathbf{u}_{конт}^{сж}$ вторичного течения молекул ЭЖК слоёв максимальна. Давление в сечении A_1A вызвано действием гидродинамических предконтактных конфузурных деформаций сжатия граничных структурно-чувствительных слоёв, что приводит к их течениям с суммарной скоростью $\mathbf{u}_л + \mathbf{u}_{20}^{сж}$. В диффузорной части также возникает дополнительное, вызванное вакуумированием ЭЖК слоёв, вторичное течение, направленное из среды в контакт и также в сторону, обратную движению вала со скоростью $\mathbf{u}_{конт}^{вак}$.

Для условий, когда разрежение в граничных слоях не превышает порогового давления, вызывающего кавитацию в среде смазки, то сила трения $F_{тр}$ или сопротивления вращения вала может быть определена, как

$$F_{тр} = f_{2м} + f_{20} + f_{к20}, \quad (7)$$

где $f_{2м}$ – гидромеханическая составляющая, возникающая от сопротивления деформированию среды при вынужденном её перемещении приповерхностными граничными слоями, которому сопротивляются близлежащие покоящиеся слои, чем в свою очередь препятствуют последующие слои и т.д. в неограниченном каком-либо препятствии объёме. Гидродинамическая составляющая силы трения f_{20} возникает при появлении вблизи одной из движущихся поверхностей, например, вращающейся поверхности, образующей цилиндр вала, другой поверхности, например, неподвижной плоской стенки на некотором расстоянии $h_{гд}$. Опыт показывает, что относительно минимального зазора или линии контакта возникают два обратных движению вала вторичных течения: в конфузурной области – от процессов сжатия среды и в диффузорной области – от процессов растяжения среды. Эти процессы приводят к возникновению соответствующих составляющих гидродинамических сил трения $f_{20} = f_{20}^к + f_{20}^0$.

Контактно-гидродинамическая составляющая силы трения $f_{к20}$ возникает в контакте граничных слоёв, которые находятся в упруго-деформационном одноосном напряженном состоянии под действием осевой силы сжатия. При относительном перемещении граничных слоёв одной поверхности по граничным слоям другой поверхности, также в конфузурной и в диффузорной областях их контакта, возникают соответствующие области сжатия и разрежения среды, создаваемые напряжениями, обусловленными упругой деформацией материалов. Под действием высоко-градиентных контактных напряжений в материалах возникают соответствующие обратные движению вала контактно-гидродинамические вторичные течения. Контактно-гидродинамическая сила трения возникает в контакте упругодеформированных ЭЖК слоев в соответствующих конфузурно-диффузорных областях контакта ЭЖК-слоёв $f_{к20} = f_{к20}^к + f_{к20}^0$.

При аддитивном формировании сил, суммарная сила трения при скольжении вала по плоской поверхности контртела представляется в обобщенном виде, как сумма первичных сил гидромеханического, гидродинамического и контактно-гидродинамического сопротивления деформированию среды:

$$F_{тр} = f_{2м} + \{ f_{20}^к + f_{20}^0 \} + \{ f_{к20}^к + f_{к20}^0 \}, \quad (8)$$

Выводы

1. Гидродинамические эффекты трения в режиме граничной смазки обусловлены образованием областей повышенного и пониженного давления смазочного слоя соответственно в конфузурной и диффузорной областях контакта. Возникающие градиенты давления в этих областях вызваны деформациями сжатия и растяжения граничных слоев, приводящими к возникновению струйных течений среды, направленных против вращения вала.

2. С увеличением осевой нагрузки, скорости скольжения и вязкости среды возрастает степень

сжатия среды «на входе в контакт» и степень её разрежения «на выходе из контакта». Области повышенного и пониженного давления жидкой среды симметричны относительно линии максимума контактных напряжений и превышают протяженность контакта в несколько раз.

3. Повышение вязкости среды сопровождается повышением степени компрессии в конфузорной области контакта и соответственным увеличением степени разрежения среды – в диффузорной.

4. Для режима граничной смазки характерно перераспределение контактной нагрузки, вызванное силами деформации сжатия и растяжения граничных слоёв в соответствующих областях контакта. Адгезионное изнашивание узлов трения происходит преимущественно в области пониженного давления среды, что следует учитывать на этапе их проектирования.

5. Смещения зоны контакта трибосистемы скольжения вызваны перераспределением давления в граничных слоях в конфузорной и диффузорной областях контакта.

6. Путем моделирования трибосистемы скольжения с линейным контактом установлено, что в топливных, масляных и других гидравлических системах, наряду с гидравлической и акустической кавитацией, имеет место и «трибокавитация» – процесс, протекающий в диффузорных областях узлов трения и приводящий к понижению местного давления в среде до значений, близких и меньших давления порога кавитации.

7. Показано, что взаимодействие смазанных поверхностей, сжатых с некоторой осевой силой, полностью обуславливаются упругими деформациями сжатия и растяжения граничных слоев смазочной жидкости в контакте.

8. Установлено, что в трибоконтакте смазочный слой в статических условиях нагружения обладает свойствами упругого твёрдого тела, а в условиях высоких контактных градиентов давления и скоростей – жидкости.

9. Результаты представленных экспериментальных исследований дополняют положения эластогидродинамической и азгедиионно-деформационной теорий трения и изнашивания новыми сведениями о динамических процессах в граничных слоях смазки.

Литература

1. Петров Н.П.– Основоположник гидродинамической теории смазки машин: труды второй всесоюзной конференции «Трение и износ в машинах» / Петров Н.П. – Москва-Ленинград : АН СССР, 1949. – Т. III. – С. 5–28.
2. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости / Петров Н.П. – СПб., 1883. – 212 с.
3. Никитин А.К. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме / Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроухов Б.И. – М. : Наука, 1981. – 316 с.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Коднир Д.С. – М. : Машиностроение, 1976. – 304 с.
5. Основы трибологии : [учебн. для техн. вузов] / под. общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.
6. Справочник по триботехнике : В 3-х т. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т.1. – 400 с.
7. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / Ахматов А.С. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
8. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. – М. : Машиностроение. – 1977. – 526 с.
9. Дерягин Б.В. Открытие СССР «Явление образования гомогенной граничной жидкокристаллической фазы немезогенной жидкости» / Б.В. Дерягин, Ю.М. Поповский, Б.А. Алтоиз // Открытия и изобретения. – 1991. – № 12. – С. 1.
10. Алтоиз Б.А. Измерение параметров граничного слоя жидкости теплоносителя, влияющих на интенсивность теплообмена / Б.А. Алтоиз, В.Т. Дейнека // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: научн.-техн. сб. – Одесса, 2003. – Вып.1. – С. 29–33.
11. Лужнов Ю.М. Нанотриботехнология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности / Лужнов Ю.М. – М. : Интекст, 2009. – 176 с.
12. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания / Стельмах А.У. – К., 2008. – 28 с.
13. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования / Стельмах А.У. – К., 2009. – 43 с.

Надійшла 6.12.2011 р.

Рецензент: д.т.н. Подчерняева І.А.