

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗРАЗМЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ СБЛИЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

В.И. Кубич¹, О.Г. Чернета², В.М. Юров³

¹Запорожский национальный технический университет,
г. Запорожье, Украина, schmirung@gmail.com

²Днепропетровский государственный технический университет,
г. Каменское, Украина, ocherneta@gmail.com

³Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова,
г. Караганда, Казахстан, e-mail: exciton@list.ru

Интенсивность гидромеханического нагружения смазочных образований, сформированных по условиям трения контактным взаимодействием, определяется рядом факторов, к которым следует отнести геометрические параметры топографии поверхностей и реологические свойства смазочных материалов. Нарушению сплошности смазочного слоя при этом предшествуют сдвиговые и нормальные деформации упорядоченных структур, сформированных в процессе приработки на обеих поверхностях, участвующих в силовом и скоростном взаимодействии. В условиях перехода от гидродинамической смазки к граничной, и смешанной смазке, картина распределения градиентов деформаций по толщине слоя неоднородная. Она определяется характером силового взаимодействия между многоатомными молекулами смазочного материала и поверхностно-активными веществами, координирующими их поведение. Текучесть смазочного материала определенной вязкости при непрерывной подаче его в зону трения предопределяет исключение возможного предельного сближения максимальных выступов микронеровностей, покрытых граничным слоем из компонентов смазочного материала. В таких условиях параметры силового и скоростного взаимодействия, фактор длительности максимально сближенного контакта, а также степень активности компонентов смазочного материала обуславливают скорость восстановления разрушенного граничного слоя. Исследованию обозначенных процессов уделено значительное внимание, и, безусловно получены результаты, рассматриваемые на фундаментальном и прикладных уровнях, например, в работах [1-3,8]. Однако вопросы оценки поведения смазочных слоев в трибосопряжениях с различной геометрией контакта в условиях отсутствия подпитки их компонентами смазочного материала в условиях граничной смазки остаются открытыми.

Обозначенная необходимость проведения исследований обусловлена в первую очередь недостаточной изученностью механизмов генерации и регенерации мономолекулярных слоев смазочного материала с учетом влияния поверхностной активности материалов трибологических систем. В этой связи является значимой разработка критериев оценки функциональности смазочных слоев в условиях «пленочного голодания» и установление закономерностей их изменения от совокупности параметров динамического нагружения. Оценке поведения смазочных слоев между поверхностями материалов с различным химическим составом и механическими свойствами посвящены работы [4-6], в которых установлена временная неоднородность изменения коэффициента граничного трения. Исходя из полученных результатов, предлагается ввести понятие «удельное время постоянства минимального коэффициента» и использовать его в качестве названия критерия для оценки функциональности смазочных слоев. Безусловно, этот критерий будет зависеть от большого количества параметров факторов влияния.

Также уделяется внимание оценке непосредственно свойств формирующихся смазочных пленок. Так в работе [10] авторы предложили реологическую модель тонкой смазочной пленки на основе физико-химических представлений об адсорбционном механизме влияния адсорбционного слоя на вязкость смазки вблизи твердой поверхности. Вязкостный параметр состояния смазки в соотношении с параметрами шероховатости контактных поверхностей

представляются основными для определения времени сохранения смазочного действия по критерию принудительного разрушения. В качестве последнего рассматривается геометрия неровностей, вызывающая, например царапающее действие.

Одним из факторов влияния на инициирование процесса деформирования упорядоченной структуры граничного слоя предлагается рассматривать скорость истечения смазочного материала при сближении поверхностей в пределах граничного слоя и неизбежном нормальном нагружении прилегающих к нему приповерхностных слоев жидкостной смазки. Данный параметр предлагается учитывать в безразмерном комплексе при моделировании характера изменения обозначенного критерия для модельных трибологических систем материалов в условиях «пленочного голодания». Например, в работе [6] оценена функциональность смазочных слоев в модельном трибосопряжении «неподвижная колодка - подвижный диск». В трибосопряжении диск изготавливался из различных экспериментальных антифрикционных материалов. В результате проведенных исследовательских работ параметры факторов влияния по признакам проявления, значимости и независимости влияния сгруппированы в три комплекса и получен вид уравнения регрессии [12]. Однако в данном направлении исследований необходимо продолжать работы. Это вызвано тем, что каждый из комплексов в зависимости от эксплуатационных условий работы рассматриваемых трибосопряжений имеет свои особенности и определенные ограничения в применении. В этой статье предлагается уделить внимание одному из них.

Целью работы является аналитическое исследование составленного ранее безразмерного комплекса параметров, учитывающего силовое и скоростное взаимодействие поверхностей трения модельных трибосопряжений контактирующих через смазочные слои при их сближении. При этом комплекс выступает как мера оценки послойной податливости упорядоченных структур смазочных образований, формируемых трением послойно между металлическими поверхностями элементов трибосопряжений.

Безразмерный комплекс физических величин составлен в соответствии с методикой, изложенной в работе [8,11]. При этом, в качестве основных параметров, учитывающих характер взаимодействия поверхностей подвижного контакта рассмотрены: скорость сближения поверхностей; коэффициент поверхностного натяжения смазочного материала; нормальная сила нагружения; частота вращения диска.

Комплекс выражен в следующем виде [11]:

$$\Pi = \frac{v_c \sigma}{P n}, \quad (1)$$

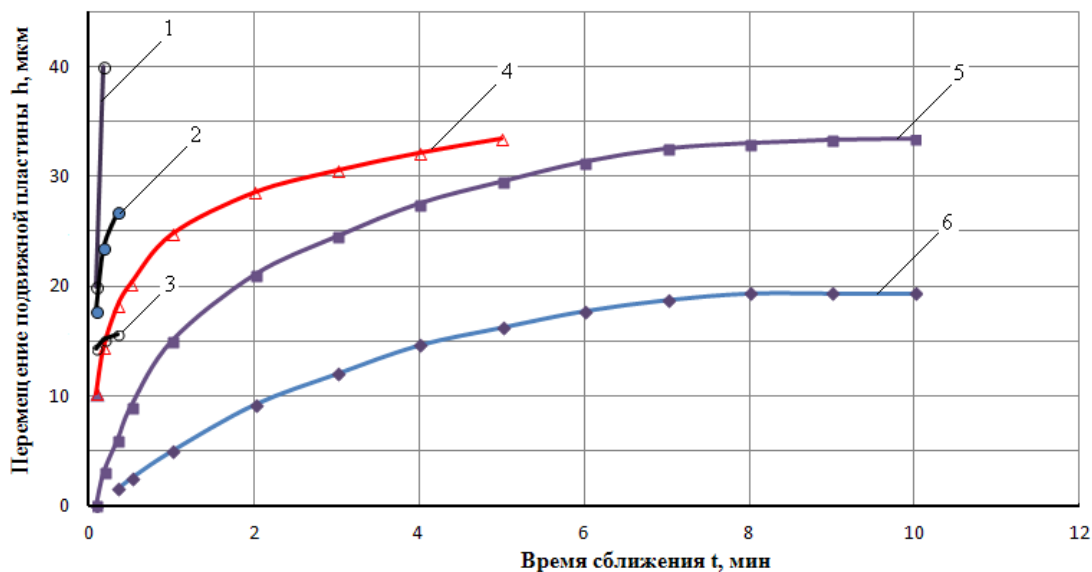
где: v_c - скорость сближения, мкм·с⁻¹; σ - коэффициент поверхностного натяжения смазочного материала, Н·м⁻¹; P - нормальная сила, Н; n - частота вращения диска, с⁻¹.

Представленный комплекс характеризует скорость уменьшения толщины смазочного слоя v_c между поверхностями элементов трибосопряжения под действием нормальной нагрузки в условиях упругого деформирования его градиентных приповерхностных частей за один оборот при определенных тепловых состояниях контакта. В данном случае речь идет о деформировании частей - субмикронных толщин нагруженных силами поверхностного натяжения. Скорость сближения предлагается определять:

- экспериментально для конкретного смазочного материала, моделируя условия взаимодействия при определенных ограничениях;

- теоретически, основываясь на теории размерностей и подобия.

В результате обработки данных, полученных в работе [11] при действии нормальной нагрузки в 70 г построены графические зависимости, рис.1. При этом среднее среднеквадратическое отклонение результатов измерения сближения плоских поверхностей составило 2,9 мкм.



1,4,5, 6 - для моторного масла SAE 15W40 Lukoil-Super SG/CD при температурах 43 °С; 23 °С; 17 °С; 11 °С; 2, 3 - для моторного масла SAE 5W-40 Special Plus SG/CD при температурах 23 °С; 17 °С

Рисунок 1. Зависимости изменения сближения поверхностей от времени испытаний

Анализ полученных результатов указывает на следующее. Скорость сближения поверхностей при вытекании масла из плоского зазора пластин носит нелинейный характер, и существенно отличается для моторных масел с разными вязкостными свойствами. Безусловно, очевидным является то, что скорость сближения поверхностей с наличием в зазоре маловязкого масла больше. И это не противоречит полученным результатам. Наличие характерных графических зависимостей позволяет определять численное значение скорости сближения поверхностей элементов модельных трибосопряжений в любой промежуток времени.

Изложенное указывает на то, что использовать полученные графические зависимости возможно только для модельной оценки скорости сближения и ее учета в предложенном безразмерном комплексе. Для учета этой физической величины в реальных натуральных трибосопряжениях и эксплуатационных условиях нагружения необходимо использовать масштабный коэффициент перехода.

Более того, при оценке сближения поверхностей необходимо также учитывать температурный параметр, который определяет характер изменения поверхностного натяжения тонких слоев смазочных образований. Так, в работе [9] получены уравнения, отражающие изменение поверхностного натяжения для ряда смазочных материалов, в том числе и для используемых моторных масел, табл.1.

Так, с учетом данных для поверхностного натяжения групп масел, приведенных в работе [9], безразмерный комплекс физических величин для оценки скорости сближения поверхностей через смазочные слои, сформированные, например, из моторного масла SAE 15W40 Lukoil-Super в соответствии с формулой (1) примет вид:

$$\Pi = \frac{\nu_c (46,6 - 0,21T)}{Pn}, \quad (2)$$

где: T - температура смазочного слоя, °С.

Аналогичным образом можно представить рассматриваемый комплекс для других масел: моторное масло 5W-40 Mobil Ralli, Motul X-ess, Special Plus; 10W-40 Motul Gtoo, Motul

300V; трансмиссионное масло ТАД-17и; промышленное масло И-20А; авиационное масло ИПМ-10; растительное МХ-1000В подсолнечное; растительное Р(0:0) рапсовое [9].

В целом, полученные данные позволяют определить численные значения предложенного комплекса. Так, на данном этапе исследований учтены следующие режимы возможного силового и скоростного нагружения трибосопряжения «неподвижная колодка - подвижный диск», поверхности элементов которого взаимодействуют через смазочные слои, сформированных из моторного масла SAE 15W40 Lukoil-Super, которые составляют:

- нормальная нагрузка 0,69 Н;
- частота вращения диска 5 с^{-1} ;
- скорость сближения в течении начальных 5-15 с взаимодействия 1,64 мкм/с (рис.1).

Тогда с учетом, того, что модельное трибосопряжение работает без подачи масла, на сформированных смазочных слоях, например при температуре $23 \text{ }^\circ\text{C}$, численное значение рассматриваемого комплекса в соответствии с формулой (1) будет иметь значение $\Pi_i=19,85 \cdot 10^{-3}$. Если же рассматривать аналогичный характер взаимодействия, но уже, например через две минуты контакта, то скорость сближения поверхностей значительно уменьшится - до $0,067 \text{ мкм/с}$. При этом численное значение комплекса уменьшится до $\Pi_{i+1}=0,81 \cdot 10^{-3}$.

Расчеты комплекса для моторного масла SAE 5W-40 Special Plus показали следующее:

- численное значение комплекса при рассматриваемых параметрах силового, скоростного нагружения и температуре составило $\Pi_i=21,64 \cdot 10^{-3}$;
- численные значения коэффициентов поверхностного натяжения масел SAE 5W-40 Special Plus и SAE 15W40 Lukoil-Super при температуре $23 \text{ }^\circ\text{C}$ примерно равны, составляют соответственно $41,96 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ и $41,77 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ соответственно.

Таким образом, очевидным представляется то, что коэффициент поверхностного натяжения для моторных масел не выступает в роли основного фактора, обуславливающего скорость сближения поверхностей при значительных толщинах смазочных слоев. Что указывает на необходимость учета для таких условий взаимодействия сопротивления сдвигу слоев, т.е. вязкости масла.

Основываясь на теории размерностей и подобия, представляется возможным выразить скорость сближения поверхностей в динамике сдвиговых перемещений:

$$v_c = \frac{P v_l^2}{\nu \sigma}, \quad (3)$$

где: ν - кинематическая вязкость смазочного материала, $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; v_l - линейная скорость поверхности элемента, нагружающего смазочный слой, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Полученное выражение позволяет оценить расчетным путем время, затрачиваемое до вероятного непосредственного контакта поверхностей при соответствующих параметрах нагружения в пределах номинальной площади трения. При этом, зная исходную геометрическую составляющую взаимодействия - максимальное удаление h_{\max} , например, на режиме гидродинамической смазки, возможно, рассчитать время расходования смазочного материала (если нет его принудительной подпитки) (4). Временной же показатель взаимодействия поверхностей через утончающиеся смазочные образования важен для разработки алгоритма принудительного управления подачей смазочного материала в зону трения.

$$t_i = \frac{h_i}{v_c} = \frac{\nu \sigma h_i}{P v_l^2}, \quad (4)$$

где: h_i - текущее (максимальное) удаление нагружающей поверхности (начальная толщина смазочного слоя), м.

Тогда с учетом выражений (1-3) рассматриваемый комплекс для трибосопряжений типа «вал-втулка» может быть приведен к следующему виду:

$$P = \frac{v_c \sigma}{Pn} = \frac{v_n^2}{vn} = \frac{v_n r \pi}{v30} = \frac{\pi^2 n r^2}{900v} \approx 0,011 \frac{n r^2}{v}, \quad (5)$$

где: r - радиус вала, м.

Таким образом, с учетом моделирования скорости сближения поверхностей для вращательной пары комплексный параметр можно привести к виду, в котором силовой параметр отсутствует. При этом определяющими будут являться скоростной режим взаимодействия, геометрический параметр элемента трибосопряжения и вязкостные свойства смазочного слоя при соответствующей температуре. Модельные преобразования указывают на то, что необходимость в учете поверхностного натяжения смазочного материала отпадает. Однако аналитическое проявление геометрического параметра - радиуса вала, на котором по условию прилипания сосредоточены смазочные образования конкретной толщины, позволяет оценивать скорость ее уменьшения с конкретного значения. Причем это значение определится варьированием геометрического параметра взаимодействия, например диаметрального зазора в трибосопряжении «вал-втулка». Тогда, с учетом одинаковых градиентов скоростей движения смазочных слоев по их толщине, выражение (5) примет вид (6). Для неодинаковых градиентов скоростей течения компонентов смазочного материала по слоям сформированных толщин (неньютоновские жидкости) выражение (5) примет вид (7).

$$P \approx 0,011 \frac{n(r_b + h_i)^2}{v} \quad (6)$$

где r_b – радиус вала по средней линии микропрофиля его поверхности.

$$P \approx 0,011 \frac{n(r_b + h_i)^2}{\int_0^{h_i} v dh_i} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что на длительность эффективного разделения поверхностей при трении, в условиях отсутствия подпитки сформированных смазочных образований компонентами из смазочной среды, в первую очередь будет оказывать их толщина с большим сопротивлением сдвигу. Это в целом не противоречит установившимся взглядам на характер протекание процессов контактного взаимодействия через смазочные образования. Аналитические выкладки еще раз указывают на необходимость создания таких условий взаимодействия между компонентами смазочных сред (молекулы $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$ и др.), и активными центрами металлов - ионы металлов, сосредоточенных непосредственно на поверхности зерен в зонах потенциального взаимодействия (например, модели адсорбции углеродородных соединений Ахматова А.С., Годфрея, Виноградовой И.Э. и др.).

- Fe^+ , Cr^+ и др., например, для элементов трибосопряжений, изготовленных из сталей;
- Cu^+ Sn^+ и др. например, для элементов трибосопряжений изготовленных из бронз;
- Al^+ , Sn^+ , Cu^+ , например, для элементов трибосопряжений, изготовленных из антифрикционного сплава АО20-1;
- и др;

для которых градиент реологических свойств смазочных образований при приближении к границам когезионных связей с поверхностью металлов должен быть положительным $d\tau/dh_i > 0$. Тогда, при наличии минимальных параметров шероховатости поверхностей, становится возможным обеспечить не повреждаемое состояние уже вторичных смазочных образований, которые обусловят определенный уровень надежности узла трения в режиме смазочного голодания. С учетом достижений научной мысли такой процесс может быть управляе-

мым, а оценить его эффективность предлагается по результатам исследования параметров рассмотренного комплекса.

В результате проведенных работ аналитически исследован составленный ранее безразмерный комплекс физических величин, характеризующих взаимодействие смазочных слоев в зоне контакта элементов модельных трибосопряжений, который приведен к виду без силового параметра нагружения. При этом показана возможность теоретической оценки скорости и времени сближения поверхностей элементов трибосопряжений через смазочные образования разной вязкости с определенного их удаления друг от друга, что дает возможность выполнять сравнительную оценку трибологического состояния рассматриваемого трибосопряжения.

Литература:

1. Войтов В.А. Моделювання процесів тертя та зношування у трибосистемах гідромашин як основа рішення задач проектування: автореф. дис... доктора техн. наук: 05.02.04 / В. А.Войтов . - Хмельницький: Технол. ун-т Поділля, 1999. - 35 с.
2. Диха О.В. Методи контактної трибомеханіки мастильних шарів і моделі зношування при граничному терті : автореф. дис.. доктора техн. наук: 05.02.04 / Диха Олександр Володимирович . - Хмельницк: Хмельниц. нац. ун-т, 2009. - 36 с.
3. Завьялов О.Г. Динамика смазочного слоя и устойчивость работы опор скольжения: автореф. дис... доктора техн. наук: 01.02.05 / Завьялов Олег Геннадьевич. - С.-Петербург. гос. ун-т. - Санкт-Петербург, 2009.- 32 с.
4. Кубич В.И. Коэффициент трения триад «45ХН2МФА - Lukoil-Super - АО20-1», «12Х2Н4 - Lukoil-Super - АО20-1» в условиях ступенчатого нагружения /В.И. Кубич// Проблемы тертя та зношування - 2013. №61. - С.37-45.
5. Кубич В.И. Поведение смазочных слоев в трибологической системе «40Х - (И-20А) - 40Х» при гранично-допустимой нагрузке / В.И. Кубич // Проблемы тертя та зношування . - 2014.- №63.- С.10-17
6. Кубіч В.І. Довготривалість граничного мащення в модельних трибологічних системах з експериментальними антифрикційними матеріалами / В.І. Кубіч В.І., В.В. Клімін // Проблемы тертя та зношування. - 2015. №66 - С.54-63
7. Мнацаканов Р. Г. Триботехнические характеристики смазочных материалов в неустановившихся условиях работы: дис... доктора техн. наук: 05.02.04 / Рудольф Георгиевич Мнацаканов - К.: Киевский международный ун-т гражданской авиации, 1998. - 491 с.
8. Справочник по триботехнике В 3 т. / [под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе] Т1. Теоретические основы. - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.
9. Кубич В.И. Термодинамический аспект пленочного голодания в трибосопряжениях / В.И. Кубич, В.М. Юров // Проблемы тертя та зношування №70. - 2016.- С.58-66
10. Mukhortov, I., Zadorozhnaya, E., Levanov, I. and Pochkaylo K. The Influence of Poly-Molecular Adsorption on the Rheological Behaviour of Lubricating Oil in a Thin Layer. FME Transactions (2015) 43, 218-222, (in Serbia).
11. Кубич В.И. Безразмерный комплекс параметров оценки сближения поверхностей модельных трибосопряжений через смазочные слои /В.И. Кубич//матер. VII межд. научн.-практ. конф. «Актуальные вопросы науки, технологии и производства», 20-21 марта 2015 г. - Ч.1. - Санкт-Петербург. - 2015. - №3(7). - С.75-79
12. Кубич В.И. Моделирование удельного времени постоянства коэффициента трения в трибологических системах /В.И. Кубич//Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 10-ой Междунар. науч. конф., 75-летию юбилею профессора З.Ж. Жанабаева., 16-18 июня 2017. - Алматы: Изд-во Ках.НУ, 2017. - С.287-292