

УДК 621.89.012.75

Е. В. Берёзина, В. А. Годлевский, А. Г. Железнов, Д. С. Фомичёв¹

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Ивановский государственный университет,
ул. Ермака, 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail: antoniron@smtp.ru
¹Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России
пр. Строителей, 33, 153040 Иваново, Россия

Применительно к мезоморфному смазочному слою, сформированному в рабочем зазоре торцевыми поверхностями двух дисков, разработано математическое описание, позволяющее описывать толщину граничной фазы и параметры течения. Рассмотрены два случая: модель жесткого срезаемого слоя с бесконечно большой вязкостью граничной зоны и модель эпитропного жидкокристаллического слоя постоянной вязкости. Определено, что эффективность мезогенных смазочных композиций определяется не столько тем, какой толщины граничный слой способны формировать трибоактивные компоненты СМ, сколько устойчивостью этого слоя при изменении условий трения.

Ключевые слова: смазочный слой, математическое моделирование, граничная смазка, надмолекулярная самоорганизация, трибоактивная присадка.

E. V. Berezina, V. A. Godlevsky, A. G. Zheleznov, D. S. Fomichev¹

ANALYTICAL EVALUATION OF STRUCTURED LUBRICATING LAYER

Ivanovo State University,
Ermak str., 39, 153025 Ivanovo, Russia. E-mail: antoniron@smtp.ru
¹Ivanovo Institute of the State Firefighting Service
Stroiteley pr., 33, 153040 Ivanovo, Russia

In connection with mesomorphic lubrication layer formed in the gap between two side surfaces of sliding disks, the mathematical description, which allows to define the thickness of boundary phase and flow parameters, was elaborated. The two cases were considered: the model of rigid sheared layer with extremely high viscosity of boundary zone and model of epitropic liquid crystal layer of constant viscosity. It is defined, that affectivity of lubrication compositions is influenced not only by the thickness of boundary layer, but also by this layers stability during changing of friction conditions.

Key words: lubrication layer, mathematical modeling, boundary lubrication, supramolecular self-organizing, tribo-active additives.

Вопрос о кинетике формирования, эволюции, структуре и свойствах смазочных слоев не теряет актуальности, несмотря на обилие исследований, российских и зарубежных. Установлено, что повышенными триботехническими характеристиками обладают смазочные материалы (СМ), в состав которых введены присадки химических соединений, способных формировать на поверхностях трения упорядоченные полимолекулярные адсорбционные слои, структура которых во многом повторяет структуру жидкокристаллической фазы вещества, в связи с чем такие упорядоченные слои получили название эпитропных жидкокристаллических слоев (ЭЖК-слоев).

Попытки описания кинетики формирования ЭЖК-слоев предпринимались, например, в работах [1, 2], однако, сама по себе кинетика интересна лишь с теоретической точки зрения и не дает картины эволюции надмолекулярной структуры слоя в процессе трения, а значит, непосредственно не выводит исследователей на решение задачи о выборе трибологически эффективных смазочных композиций. Другим подходом к решению вопросов о структуре приповерхностных адсорбционных слоев, а значит и об их физико-механических свойствах, является метод молекулярного моделирования. Важность и фундаментальность такого подхода, тем более в эпоху бурного развития многопроцессорных вычислительных комплексов, переоценить практически невозможно. Однако, на наш взгляд, в таком подходе скрыт один существенный методологический недостаток: для грамотного проведения численного эксперимента необходимо не только умение работать со стандартными программными пакетами и методами молекулярной динамики (такими, например, как NupherChem [3]), но и быть знакомыми с основами квантово-химических расчетов, что в условиях технических центров по разработке и исследованию СМ не всегда возможно.

Существенным недостатком существующих методов трибологических испытаний смазочных материалов является отсутствие возможности наблюдения, регистрации и контроля процессов, происходящих в смазочном слое, непосредственно в процессе трения. Таким образом, разработка новых методик исследования параметров СМ, позволяющих получать максимально полную комплекс-

ную информацию о структуре и свойствах смазочного слоя непосредственно в процессе трения, является одной из первоочередных задач современной науки о СМ, что отмечается, например, в [4].

По современным представлениям, структура смазочного слоя, разделяющего контактирующие поверхности, не только сложна, но динамична и обуславливается, в частности, самоорганизацией компонентов СМ в пространстве между контактирующими поверхностями.

Проблема надмолекулярной самоорганизации смазочного слоя в последние годы была подробно изучена в работах К. Кравчика [5, 6]. Автором была предложена концепция модели структурных превращений смазочной среды в зоне трения при переходе от гидродинамического режима трения к граничному. Согласно этим взглядам, сила трения при гидродинамическом режиме определяется, главным образом, реологическими свойствами смазочной среды, в том числе зависимостью вязкости от давления и температуры. Кравчик предлагает следующую схему процесса. На рис. 1 хорошо видна корреляция при небольших нагрузках между реологическими свойствами одних и тех же масел, полученными на вискозиметре высокого давления (рис. 1, а), и силой трения (рис. 1, б) в гидродинамическом режиме.

Характер возрастания силы трения до критических точек во многом подобен характеру роста вязкости при увеличении давления в условиях без сдвига, что реализуется в вискозиметрах высокого давления, где вязкость начинает расти асимптотически. Образование при этом пространственных структур под влиянием давления автор характеризует как стеклование [6]. В условиях трения сдвиг приводит к разрушению такой структуры, фрагменты которой упорядочиваются движением и уменьшают сопротивление сдвига. В таком структурном фазовом переходе К. Кравчик видит признаки самоорганизации.

Дальнейшее увеличение нагрузки (рис. 2) приводит к разрушению этих упорядоченных структур, а условия, существующие в зоне трения в сочетании с поверхностной энергией и природой смазочной среды, например с ее полярностью, приводят к возникновению «толстых» полимолекулярных пленок, увеличивающих силу трения, но обеспечивающих защиту поверхности (область III, рис. 2).

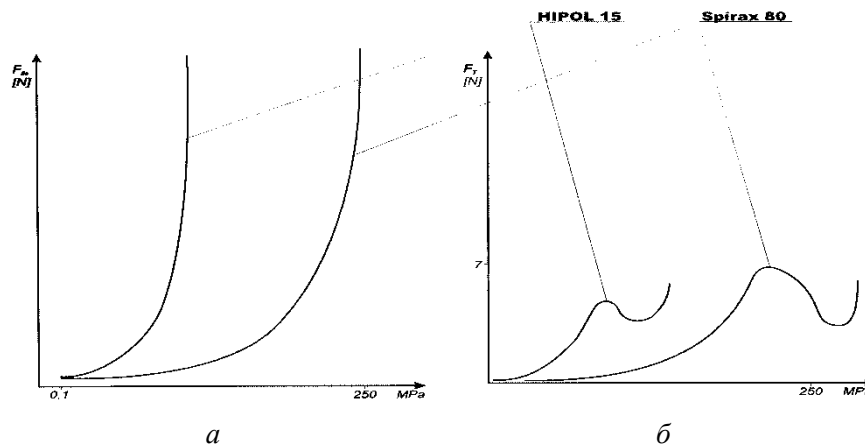


Рис. 1. Зависимость вязкости (а) и силы трения (б) от давления и нагрузки [6]

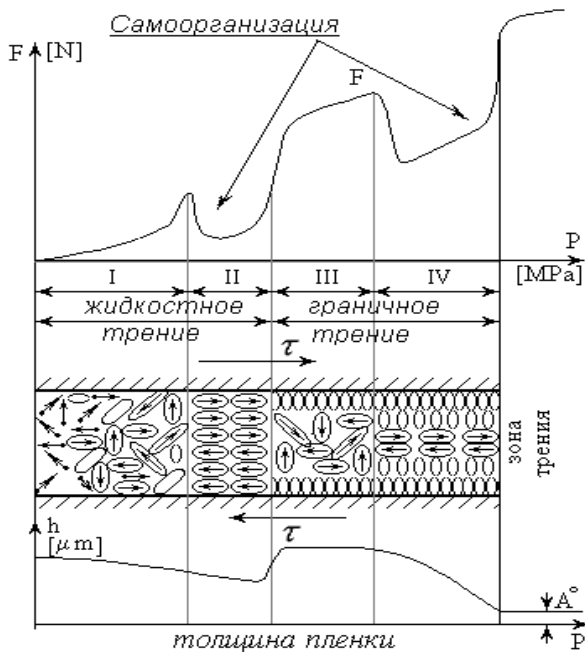


Рис. 2. Модель изменения динамической структуры смазочной среды в зоне трения:

I, II – ньютоновская жидкость;

III, IV – вязкопластичная жидкость [6]

Структура таких пленок упорядочивается, прежде всего, за счет поверхностной энергии, а их свойства можно характеризовать как вязкопластичные. Дальнейший рост нагрузки снова разрушает возникшую структуру, а ее фрагменты упорядочивают движение (область IV, рис. 2). Упорядочение движением и в этом случае имеет признаки самоорганизации.

Таким образом, данные К. Кравчика, а также и других исследователей, говорят о том, что в сма-

зочных слоях как при гидродинамическом, так и при граничном режимах смазки, существует возможность надмолекулярной самоорганизации СМ, которая зависит от молекулярной структуры СМ, свойств поверхностей трения, силовых и тепловых параметров процесса. До настоящего момента структурные превращения, представленные на рис. 2, не поддавались непосредственному наблюдению и количественной оценке.

Для решения этой задачи был разработан поляризационный трибометр, позволяющий исследовать оптические и трибологические характеристики СМ [7]. Конструкция прибора состоит из плоскопараллельных оптических окон, микрометрического устройства для регулирования зазора между плоскопараллельными оптическими окнами, двигателя, обеспечивающего равномерную или изменяющуюся по заданному закону скорость скольжения в зоне измерения. Установка снабжена оптической системой из лазера и поляризатора, обеспечивающей формирование оптического сигнала, количественно отражающего степень надмолекулярной самоорганизации смазочного слоя непосредственно в процессе трения.

Для изучения надмолекулярной самоорганизации СМ в процессе трения необходимо разработать теоретическое описание гидродинамических и оптических явлений, происходящих в рабочей зоне поляризационного трибометра с учетом примененной схемы трения. В настоящей работе мы остановимся на гидродинамической задаче, связанной с течением СМ в рабочем зазоре.

Далее приведены результаты математического моделирования сдвигового течения СМ для двух случаев структурообразования на поверхностях трения:

- модель жесткого срезаемого слоя с бесконечно большой вязкостью граничных слоев;
- модель ЭЖК-слоя постоянной вязкости.

Рассмотрим задачу о движении вязкой жидкости в зазоре толщиной d между неограниченными плоскостями, из которых нижняя неподвижна, а верхняя вращается с постоянной угловой скоростью ω (схема, соответствующая принципу работы описанного выше прибора, см. рис. 3).

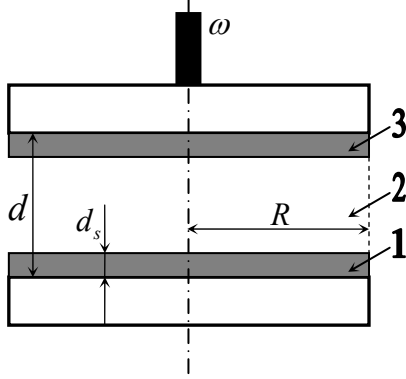


Рис. 3. Схема измерительной ячейки поляризационного трибометра:
1, 3 – ЭЖК-слои, 2 – объемная жидкость

Как известно [8], движение вязкой жидкости описывается уравнением Навье – Стокса, которое, применительно к рассматриваемой цилиндрически-симметричной задаче о движении вязкой несжимаемой жидкости для единственной ненулевой компоненты скорости $v = v_\varphi(r, z)$ будет иметь вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{v}{r^2} = 0. \quad (1)$$

Зададим граничные условия рассматриваемой задачи в виде:

$$v(0, z) = 0, \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)_{r=0} = 0, v(r, 0) = 0, v(r, d) = \omega r, \quad (2)$$

где условие $\left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)_{r=0} = 0$ означает равенство нулю компоненты касательного напряжения $\sigma_{r\varphi}$ и следует из рассмотрения уравнения равновесия цилиндрического слоя [9].

Решая уравнение (1) с граничными условиями (2), получим выражение для поля скоростей в слое в виде:

$$v(r, z) = \omega r \frac{z}{d} \quad (3)$$

Полученное распределение скоростей позволяет вычислить единственную отличную от нуля компоненту касательного напряжения $\sigma_{\varphi z}$, которая, в свою очередь, позволяет рассчитать момент сил вязкого трения M , действующих на подвижный диск трибометра. В соответствии с [8] касательное напряжение составит:

$$\sigma_{\varphi z} = \eta_e \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\eta_e \omega}{d} r, \quad (4)$$

где η_e – эффективная регистрируемая прибором вязкость СМ.

В описываемом приборе СМ помещен в зазор между двумя дисками радиусом R каждый.

Момент сил вязкого трения, действующий на верхний (подвижный) диск, может быть подсчитан по формуле

$$M = \int_0^R r \sigma_{\varphi z} dS,$$

которая, используя выражение для касательного напряжения (4), дает

$$M = \int_0^R r \sigma_{\varphi z} dS = \frac{2\pi \eta_e \omega}{d} \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi \eta_e \omega R^4}{2d}. \quad (5)$$

В качестве исследуемой жидкости рассмотрим СМ с трибоактивной присадкой «структурного действия», т. е. такой СМ, активный компонент которого образует на поверхностях трения приповерхностные упорядоченные адсорбционные слои толщиной d_s , (ЭЖК-слои), являющиеся эффективными барьерами граничного трения.

В модели жесткого срезаемого слоя [10] полагаем, что вязкость η_s структурированного ЭЖК-слоя бесконечно велика и жидкость с объемной вязкостью η_0 совершает движение между двумя дисками в зазоре толщиной

$$h = d - 2d_s. \quad (6)$$

В этом приближении, используя уравнения (5) и (6), можно получить выражение, позволяющее рассчитать толщину формирующегося ЭЖК-слоя:

$$d_s = \frac{d}{2} - \frac{h}{2} = \frac{d}{2} - \frac{\pi \eta_0 \omega R^4}{4M}. \quad (7)$$

Таким образом, используя измеряемые параметры d, η_0, ω и M , по уравнению (7) можно

определить толщину слоя адсорбированных из объема СМ молекул поверхностями трения d_s .

В модели ЭЖК-слоя постоянной вязкости [10] жидкость в зазоре между поверхностями трения содержит пристенные структурированные слои толщиной d_s с коэффициентом вязкости η_s , между которыми заключен слой объемной жидкости толщиной h с объемной вязкостью η_0 .

Для решения задачи о движении такой двухфазной вязкой жидкости необходимо, в дополнение к уравнению (1), потребовать выполнения граничных условий, включающих условия сцепления пристенных слоёв с опорными поверхностями, а также сопряжения скоростей и касательных напряжений на границах раздела областей с различными вязкостями. Таким образом, имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1(0, z) = 0, \\ v_1(r, 0) = 0, \\ v_1(r, d_s) = v_2(r, d_s), \\ \sigma_1(r, d_s) = \sigma_2(r, d_s), \\ v_2(0, z) = 0, \\ v_2(r, d - d_s) = v_3(r, d - d_s), \\ \sigma_2(r, d - d_s) = \sigma_3(r, d - d_s), \\ v_3(0, z) = 0, \\ v_3(r, d) = \omega r \end{array} \right. , \quad (8)$$

где $\sigma_i = \sigma_{\varphi zi} = \eta_i \frac{\partial v_i}{\partial z}$, $i = 1, 2, 3$ – касательные напряжения в областях 1, 2 и 3.

Решение уравнения (1) с граничными условиями (8) будем искать методом Фурье, представляя функции скорости в каждой из областей 1, 2 и 3 в виде

$$v_i(r, z) = R_i(r)Z_i(z) = R_i Z_i. \quad (9)$$

Подставляя выражение (9) в уравнение (1), получим равенство

$$\frac{1}{rR_i} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR_i}{dr} \right) - \frac{1}{r^2} = -\frac{1}{Z_i} \frac{d^2 Z_i}{dz^2} = \lambda, \quad (10)$$

в котором λ — действительное число.

Учитывая необходимость возможности предельного перехода от решения уравнения (10) к выражению (3), заключаем, что единственно возможным значением числа λ является нуль. Тогда уравнение для радиальной части R_i представляет

собой уравнение Эйлера с фундаментальной системой решений r и $1/r$, а общие решения для $R_i(r)$ и $Z_i(z)$ будут иметь вид:

$$R_i(r) = \tilde{A}_i r + \frac{\tilde{B}_i}{r}, Z_i(z) = \tilde{C}_i z + \tilde{D}_i. \quad (11)$$

Выражения (11) позволяют записать общее решение уравнения (1) в виде:

$$v_i(r, z) = \left(A_i r + \frac{B_i}{r} \right) (z + C_i), \quad (12)$$

где $A_i = \tilde{A}_i \tilde{C}_i$, $B_i = \tilde{B}_i \tilde{C}_i$, $C_i = \tilde{D}_i / \tilde{C}_i$.

Полученное общее решение (12) уравнения (1) с учетом граничных условий (8) позволяет найти неизвестные постоянные A_i, B_i, C_i во всех трех рассматриваемых областях.

Исходя из условий равенства нулю азимутальной проекции скорости жидкости на оси дисков, заключаем, что $B_1 = B_2 = B_3 = 0$. Для определения постоянных A_i и C_i , с учетом (8) получим систему из шести алгебраических уравнений с шестью неизвестными

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 C_1 = 0, \\ A_1 (d_s + C_1) = A_2 (d_s + C_2), \\ \eta_s A_1 = \eta_0 A_2, \\ A_2 (d - d_s + C_2) = A_3 (d - d_s + C_3), \\ \eta_0 A_2 = \eta_s A_3, \\ A_3 (d + C_3) = \omega. \end{array} \right.$$

решением которой является набор констант:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = \frac{\omega}{\frac{\eta_s}{\eta_0} \left(d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right) \right)}, \\ A_2 = \frac{\omega}{d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right)}, \\ A_3 = \frac{\omega}{\frac{\eta_s}{\eta_0} \left(d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right) \right)}, \\ C_1 = 0, \\ C_2 = -d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right), \\ C_3 = -d + \frac{\eta_s}{\eta_0} \left(d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right) \right). \end{array} \right.$$

Тогда выражения для полей скоростей в каждой из областей 1, 2 и 3 примут вид:

$$v = \frac{\omega}{d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right)} \begin{cases} \frac{\eta_0}{\eta_s} r z \\ r \left(z - d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right) \right) \\ \frac{\eta_0}{\eta_s} \left(z - d + \frac{\eta_s}{\eta_0} \left(d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right) \right) \right) \end{cases} \quad (13)$$

Получив распределение скоростей (13), можно рассчитать напряжение силы вязкого трения, определяющее момент сил M , действующий на подвижный диск радиуса R :

$$\sigma_{\varphi z 3} = \eta_s \frac{\partial v_3(r, z)}{\partial z} = \frac{\eta_0 \omega r}{d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right)}$$

Тогда момент сил вязкого трения, действующих на подвижный диск, равен:

$$M = \int_0^R r \sigma_{\varphi z 3} dS = \frac{\pi \eta_0 \omega R^4}{2d - 4d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right)},$$

откуда получаем искомое расчетное выражение для толщины ЭЖК слоя в модели слоя постоянной вязкости:

$$d_s = \frac{1}{1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}} \left(\frac{d}{2} - \frac{\pi \eta_0 \omega R^4}{4M} \right). \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет по известным значениям объёмной вязкости η_0 и вязкости η_s , измеренных на сверхтонких прослойках, когда в слое присутствуют только ЭЖК-слои, рассчитать толщину слоя, состоящего из адсорбированных поверхностями трения молекул трибоактивных присадок в случаях течения двухфазного СМ между твердыми поверхностями.

Вязкостные свойства оказывают важное влияние на трибологическую эффективность СМ, поскольку именно значение вязкости определяет степень разделения взаимодействующих поверхностей, причем это справедливо даже для процессов резания, хотя и в меньшей степени. Разумно предположить, что эффективная вязкость гранич-

ных слоев η_s является функцией скоростей относительного движения поверхностей и приложенных к трибоконтакту напряжений, т. е. является характеристикой неньютоновского поведения граничного слоя СМ.

Исходя из этого, толщина ЭЖК-слоя d_s является функцией тех же самых параметров. А этот факт свидетельствует о том, что эффективность смазочных композиций определяется не столько тем, какой толщины граничный слой способны формировать трибоактивные компоненты СМ, сколько устойчивостью этого слоя при изменении условий трения.

Список литературы / References

1. Железнов А. Г. // Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современное машиностроение. Наука и образование» / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2013. С. 326–330.
2. Берёзина Е. В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным композициям. Иваново : Иван. гос. ун-т, 2007. 240 с.
3. Годлевский В. А. и др. // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте : тр. V Междунар. симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013». СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2013. С. 63–66.
4. Браун Э. Д., Буяновский И. А., Воронин Н. А. и др. Современная трибология. Итоги и перспективы. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 476 с.
5. Кравчик К. Трибологическая идентификация самоорганизации при трении со смазкой : Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/ Д., 2000. 282 с.
6. Кравчик К. // Вестник ДГТУ. 2001. Т. 1, № 4 (10). С. 54–62.
7. Березина Е. В., Годлевский В. А., Фомичев Д. С., Корсаков М. Н. // Труды Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностр. спец. «Проблемы машиноведения: Трибология – машиностроению». Москва, ИМАШ РАН, 29–31 октября 2012. Т. 1. С. 244–247.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Гидродинамика. 3-е изд., испр. М. : Наука, 1986. 736 с.
9. Белкин И. М., Виноградов Г. В., Леонов А. И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. М. : Машиностроение, 1968. 272 с.
10. Алтоиз Б. А., Асланов К., Бутенко А. Ф. // Физика аэродисперсных систем. 2005. Вып. 42. С. 53–65.

Поступила в редакцию 20.03.2014 г.

