

УДК 621.892

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОДИНАМИКИ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩЕГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Н. Н. МИХНЕВИЧ^а, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ^б, В. А. СМУРУГОВ^{б+}

Приведены результаты экспериментального изучения методом “стопы слоев” реологических характеристик полимерсодержащих смазочных сред. Показано, что смазочный слой в зоне контакта является вязкоупругоупругой системой. Для ряда смазочных составов измерены предел текучести и модуль упругости. Получена реологическая модель вязкоупругоупругости разделительного слоя в зоне контакта.

Ключевые слова: полимерсодержащие смазочные среды, реологические характеристики, метод “стопы слоев”, вязкоупругоупругая система.

Введение. В технологических процессах металлообработки широко применяются полимерсодержащие смазочные среды (СС). При обработке металлов, например, давлением, полимерсодержащие смазочные среды позволяют расширить ассортимент обрабатываемых металлов, увеличить степень вытяжки, снизить энергозатраты, повысить качество получаемых деталей. Эффективность полимерсодержащих СС определяется их высоким пластифицирующим действием, способностью создавать прочные граничные смазочные слои, локализирующие деформацию сдвига, высокой скоростью экранирования образующихся новых поверхностей.

Поведение СС в зазоре между контактирующими поверхностями в значительной степени определяется ее реологическими свойствами. Знание реологических характеристик СС, закономерностей их поведения в контактной зоне дает возможность найти дополнительные критерии для оптимизации составов, для выбора режимов работы, расширения сферы применения.

Цель работы — экспериментально изучить реологическое поведение тонкого полимерсодержащего смазочного слоя в зазоре между металлическими поверхностями.

Методика исследований. Изучение реологического поведения полимерсодержащих смазок осуществляли методом “стопы слоев” [1]. Измеряли суммарную деформацию 150 смазочных слоев, находящихся между металлическими пластинами. В опытах использовали медные пластины диаметром 27,5 мм и толщиной 0,05 мм, обработанные до шероховатости $R_a = 0,2 \pm 0,3$ мкм. В ходе опытов микрометром с точностью измерения ± 2 мкм фиксировали суммарную толщину смазочных слоев между пластинами, ее изменения во времени и от нагрузки.

Смазочные композиции для исследований готовили на основе масел органического и минерального происхождения. В качестве наполнителей были выбраны порошки полимеров с различными физико-химическими и механическими свойствами: политетрафторэтилен (ПТФЭ), полирифторхлорэтилен (ПТФХЭ), полиэтилен (ПЭ), поливинилбутираль (ПВБ), поливинилхлорид (ПВХ), поливинилстирол (ПВС), полиамид (ПА). Дисперсность порошков составляла 100÷400 мкм. Наполнители в количестве 10 мас.% смешивали с базовым маслом при комнатной температуре.

а Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

б Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. 246652, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Ранее [2—4] авторами было установлено, что наполнение базовых сред высокодисперсными полимерами увеличивает толщину смазочных слоев, их грузонесущую способность, время вытеснения смазочных материалов из зазора: в 3—4 раза при наполнении минеральных масел и в 30—40 раз при наполнении базовых сред органического происхождения (жировой гудрон). Для малополярных минеральных масел повышение грузонесущей способности разделительного смазочного слоя в основном связано с механическими свойствами введенного полимера (твердостью и дисперсностью). Для полимерсодержащих смазочных материалов на основе сред органического происхождения (жировой гудрон и др.) отсутствует корреляция толщины разделительного смазочного слоя и его грузонесущей способности с твердостью и дисперсностью полимерного наполнителя. В зависимости от базовой среды грузонесущая способность полимерсодержащих смазочных материалов для исследованных полимеров располагается в ряду: минеральные масла — растительные масла — жировой гудрон [5].

Анализ изменения толщины слоя при увеличении и уменьшении нагрузки позволил сделать вывод, что тонкий слой полимерсодержащего смазочного материала в зоне контакта сопряженных поверхностей обладает как упругими, так и пластичными свойствами (рис. 1, 2). Резко выражен-

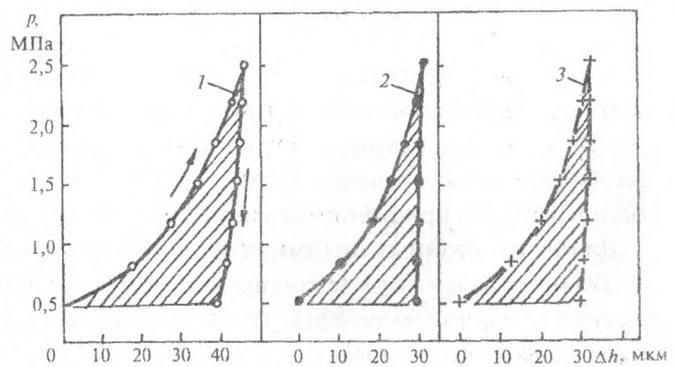
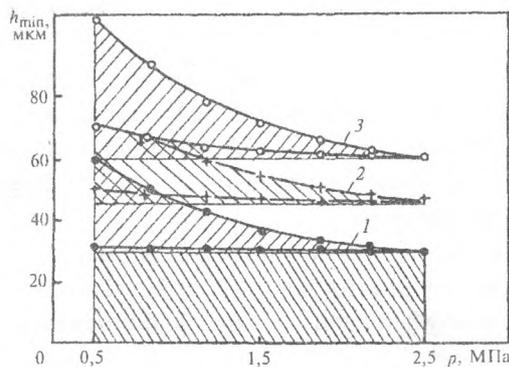


Рис. 1. Зависимость от нагрузки установившейся толщины слоев жирового гудрона, наполненного ПВХ (1), ПВС (2) и ПА (3) при нагружении и разгрузке слоя

Рис. 2. Диаграмма упругости при сжатии полимерсодержащих разделительных слоев на основе жирового гудрона, наполненного ПА (1), ПВХ (2), ПВС (3)

ный гистерезис кривых свидетельствует о значительном превалировании остаточной, т. е. пластической деформации над обратимой упругой деформацией слоя. Полимерсодержащий смазочный слой в зоне контакта следует рассматривать как вязкоупругопластичную систему, в которой упругое и пластическое деформирование протекает как вязкое течение, а описание реологического поведения должно содержать реологические уравнения вязкоупругости и вязкопластичности.

В соответствии с подходом Кельвина—Фойхта [6] при одновременном проявлении упругости и вязкости общее напряжение в деформируемой среде P_{ij} является простой суммой упругого напряжения и напряжения вязкого течения. Реологическое уравнение вязкоупругости в этом случае обрзается как сумма соответствующих уравнений упругости Гука и вязкости Ньютона:

$$P_{i,j} = \frac{E}{1+\sigma} \epsilon_{ij}^{(e)} + \frac{\sigma P_{kk} g_{ij}}{1+\sigma} + 2\mu_0 \dot{\epsilon}_{ij}^{(e)}. \quad (1)$$

Реологическое уравнение вязкопластичности (линейной) при одновременном проявлении пластичности и вязкости получено Ильюшином—Хенки как обобщение реологической модели Шведова—Бингама [7] и записывается в виде

$$\begin{cases} P_{ij} = -p g_{ij} + 2 \left\{ \mu_0 + \frac{\tau_0}{\sqrt{2 \dot{\epsilon}_{km}^{(p)} \dot{\epsilon}_{km}^{(p)}}} \right\} \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} & \text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} P_{ji}) > \tau_0^2 \\ \dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} = 0, & \text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} P_{ji}) \leq \tau_0^2. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) могут быть использованы для анализа вязкоупругости и вязкопластичности полимерсодержащего разделительного смазочного слоя.

Так как напряжения в данной точке разделительного смазочного слоя одинаковы и для упругой и для пластической деформации, а деформации аддитивны и независимы, то обобщенное реологическое уравнение моделируемого вязкоупругопластичного полимерсодержащего разделительного смазочного слоя можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{i,j} &= \frac{E}{1+\sigma} \varepsilon_{ij}^{(e)} + \frac{\sigma P_{kk} g_{ij}}{1+\sigma} + 2\mu_0 \dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)} \\ \left. \begin{aligned} P_{ij} &= -p g_{ij} + 2 \left\{ \mu_0 + \frac{\tau_0}{\sqrt{2 \dot{\varepsilon}_{km}^{(p)} \dot{\varepsilon}_{km}^{(p)}}} \right\} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} & \text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} P_{ji}) > \tau_0^2 \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} &= 0, & \text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} P_{ji}) \leq \tau_0^2 \end{aligned} \right\} & (3) \\ \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(p)} &= \varepsilon_{ij} \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} &= \dot{\varepsilon}_{ij} \end{aligned} \right\}$$

Система реологических уравнений (3) учитывает аддитивность упругих и пластических деформаций, их независимость, учитывает индифферентность вязкого течения (т. е. вязкостных свойств среды) относительно типа деформации, предполагает развитие пластической деформации только при напряжениях, превышающих предел текучести, т. е. система учитывает основные закономерности и свойства присущие полимерсодержащему смазочному слою.

Для исследованных полимерсодержащих смазочных сред величина упругих деформаций сжатия значительно меньше величины пластических деформаций сжатия $\varepsilon_e < 0,15\varepsilon_p$, т. е. в большинстве случаев моделируемую среду (полимерсодержащий смазочный слой) можно приближенно считать вязкопластичной средой.

Исходя из обобщенного реологического уравнения вязкопластичности (2), можно получить выражение для определения силы, действующей со стороны выдавливаемой вязкопластичной среды на сближающиеся диски

$$F_{om} = \int_0^R 2\pi r p dr = \frac{\pi \tau_0 R^3}{h} - \frac{3\pi \mu_0 R^4}{2h^3} \left(-\frac{dh}{dt} \right) \quad (4)$$

Из него следует, что при $t \rightarrow \infty$ величина зазора не становится равной нулю, а стремится к некоторому предельному значению

$$h_p = \frac{\pi R^3 \tau_0}{F} \quad (5)$$

При использовании экспериментальных данных выражение (5) позволяет определить предел текучести исследованных полимерсодержащих сред. Значения предела текучести полимерсодержащих систем для различных базовых сред и наполнителей приведены на рис. 3.

Из приведенных данных следует, что предел текучести исследуемых полимерсодержащих разделительных смазочных слоев определяется видом полимерного наполнителя и базового масла, величиной нагрузки и, соответственно, толщиной слоя. При этом отсутствует корреляция величины предела текучести с величиной упругости полимерного наполнителя.

В качестве количественной характеристики упругости слоя использован модуль упругости Юнга

$$E = -\frac{\Delta F}{\Delta h_e} \frac{h}{S} \quad (6)$$

На рис. 4 представлены значения модуля Юнга для разделительного слоя, образуемого жировым гудроном, наполненным 10 мас.% ПВХ, ПВС, ПА. Видно, что количественная характеристика

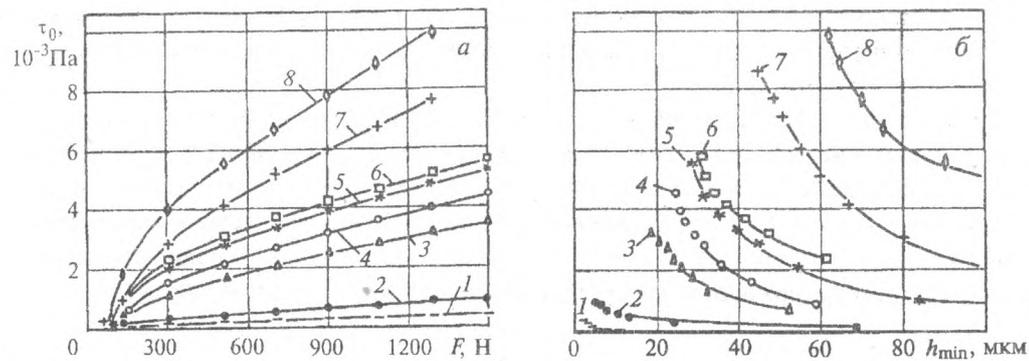


Рис. 3. Значения предела текучести слоев жирового гудрона (1), наполненного ПТФЭ (2), ПТФХЭ (3), ПЭ (4), ПВХ (5), ПВХ (6), ПВС (7), ПА (8) в зависимости от величины контактного давления (а) и толщины слоя (б)

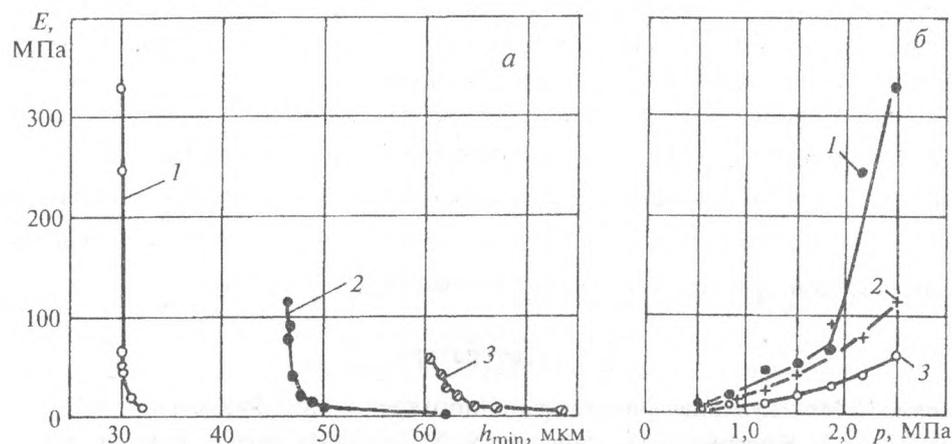


Рис. 4. Значение модуля Юнга слоев жирового гудрона, наполненного ПВХ (1), ПВС (2) и ПА (3), в зависимости от толщины слоя (а) и нагрузки (б)

упругости значительно варьирует для различных полимерных наполнителей и возрастает при увеличении нагрузки или соответственно при уменьшении толщины слоя.

Вследствие способности полимерсодержащего смазочного слоя упруго деформироваться толщина слоя дополнительно уменьшается на величину упругой деформации h_e

$$h_e = \frac{Fh}{\pi R^2 E}, \quad (7)$$

где $h = h_p$ для уравнений (6), (7).

После снятия внешней нагрузки толщина слоя снова возрастает благодаря обратимости упругих деформаций.

Вследствие аддитивности пластических и упругих деформаций предельная (минимальная) толщина слоя будет равна:

$$h_{\min} = h_p - h_e = \frac{\pi R^3 \tau_0}{F} - \frac{F h_p}{\pi R^2 E} = R \tau_0 \left(\frac{\pi R^2}{F} - \frac{1}{E} \right). \quad (8)$$

Выражение (8) может быть использовано для оценки минимальной (предельной) толщины вязкоупругопластичного слоя между сближающимися под внешней нагрузкой плоскопараллельными дисками. Оно отличается от соответствующих выражений для нормально-вязких, вязкопластичных и вязкоупругих сред.

Выводы. Таким образом, экспериментальное исследование, выполненное методом "стопы слоев" позволило определить механизм влияния полимерных наполнителей на несущую способность смазочного слоя. Показано, что полимерсодержащий слой в зоне контакта обладает сложным рео-

логическим поведением, а именно, является вязкоупругопластичной системой. Измерены основные характеристики (предел текучести, модуль упругости) для ряда полимерсодержащих смазочных материалов в зоне контакта.

Установлено, что несущая способность полимерсодержащего смазочного слоя определяется, в основном, его пластичными свойствами (пределом текучести). Показана связь предела текучести с адгезионным взаимодействием компонентов полимерсодержащих смазочных материалов.

На основании полученной реологической модели вязкоупругопластичности разделительного слоя в зоне контакта представляется возможность более детально прогнозировать эффективность применения полимерсодержащих смазочных материалов в различных фрикционных сопряжениях.

Обозначения

E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; μ — динамический коэффициент вязкости смазочного материала; S, h — площадь и толщина слоя между плоскопараллельными дисками; h_e — изменение толщины слоя при разгрузке; τ_0 — предел текучести слоя; F — внешняя нагрузка; h_{\min} — остаточная толщина слоя; R — радиус диска; t — время; P — локальное давление в слое; P_{ij} — тензор напряжений; P_{kk} — линейный инвариант тензора напряжений; $\epsilon_{ij}^{(e)}$ — тензор упругих деформаций; $\dot{\epsilon}_{ij}^{(e)}$ — тензор скоростей упругих деформаций; $\epsilon_{ij}^{(p)}$ — тензор пластических деформаций; $\dot{\epsilon}_{ij}^{(p)}$ — тензор скоростей пластических деформаций; $\dot{\epsilon}_{km}^{(p)} \cdot \dot{\epsilon}_{km}^{(p)}$ — квадратичная форма тензора скоростей деформаций; ϵ_{ij} — тензор полных деформаций; g_{ij} — метрический тензор.

Литература

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз (1961)
2. Sviredjonok A. J., Smurugov V. A., Mihnevic N. N. Triboloske karakteristike maziva sa polimernim sadrzajem // Zbornik radova XIX savetovanje proizvodnog masintva Jugoslavije. Kragujevac (1985), 159—164
3. Белый В. А., Михневич Н. Н., Смуругов В. А. О роли и механизме влияния полимерных наполнителей на несущую способность смазочного слоя // Трение и износ, 7 (1986), № 3, 408—413
4. Belyi V. A., Sviridenok A. I., Michnevic N. N., Smurugov V. A. Adgesion in polymerhaltigen Schmierstoffen und ihr Einflub auf die Eigenschaften der Grenzschichten // Schmierungstechnik, Berlin (1987) № 18, 301—304
5. Михневич Н. Н., Золотовицкий Я. М., Смуругов В. А. Исследование механизма формирования и свойств граничных слоев полимерсодержащих технологических смазок // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. (1988), № 2, 38—42
6. Реология. Теория и приложения / Под ред. Ф. Эйриха М.: Изд-во ин. лит. (1962)
7. Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. М.: Изд-во Моск. ун-та (1977)

Поступила в редакцию 02.04.99.

Mikhnevich N.N., Pleskachevskii Yu.M., and Smurugov V.A. Investigation of rheodynamics of polymer-containing separating lubricating layer.

Results of experimental studies of the rheological characteristics of polymer-containing lubricants using the method of "layer package" are disclosed showing that the lubricating layer in the contact zone is an elastoviscous system. The ultimate fluidity and the modulus of elasticity have been measured for a number of lubricating compositions. A rheological model of elastoviscous plasticity in the contact zone has been constructed.