

УДК 621.892

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕД

Н. Н. МИХНЕВИЧ<sup>1</sup>, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ<sup>2</sup>, В. А. СМУРУГОВ<sup>2+</sup><sup>1</sup> Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.<sup>2</sup> Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, ул. Кирова 32а, 246050 г. Гомель, Беларусь.

*На вискозиметре «Реотест-2» изучены объемные реологические свойства полимернаполненных смазочных материалов. Обнаружены аномалии их вязкости и ярко выраженная тиксотропия. С помощью критерия Хаггинса установлено, что при наполнении базовых масел полимерами в зависимости от поверхностной активности полимера образуется либо «концентрированные», либо «разбавленные» суспензии. При наполнении некоторыми полимерами тиксотропные системы переходят в дилатантные и реопексные. Появление у смазочной системы свойства дилатантности улучшает ее эксплуатационные характеристики.*

### Введение

В различных отраслях техники все более широкое применение получают полимерсодержащие смазочные материалы, имеющие существенные достоинства в тяжело нагруженных фрикционных сопряжениях. Введение полимерных наполнителей в масла позволяет в широких пределах регулировать эксплуатационные свойства смазочных материалов, повысить технологичность и экономичность производственных процессов, надежность и долговечность машин и механизмов. Однако, до настоящего времени недостаточно изучен механизм влияния полимерных наполнителей на эффективность действия смазочных материалов, на их реологические и эксплуатационные свойства.

### Цель работы

Изучить объемные реологические свойства полимерсодержащих смазочных материалов.

### Методика исследований

Реологические свойства дисперсий базовая среда – полимерный наполнитель определяли на ротационном вискозиметре «Реотест-2» в условиях возрастающих и убывающих в диапазоне 0,13–121,5 с<sup>-1</sup> скоростей деформации. По измеренным сдвигающему напряжению  $\tau$  и скорости сдвига  $D$  определяли динамический коэффициент  $\mu = \tau D$ . Для неньютоновских жидкостей данным путем получали значение эффективной вязкости исследуемого материала. Для материалов с тиксотроп-

ными и реопексными структурами снимали кривые гистерезиса, а также зависимости напряжения сдвига от времени приложения сдвигающей нагрузки при постоянной скорости сдвига.

В качестве объектов исследования использовали смазочные композиции, содержащие порошкообразные полимеры: полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ), политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ), полиэтилен (ПЭ), поливинилбутираль (ПВБ), поливинилхлорид (ПВХ), поливинилстирол (ПВС), полиамид (ПА), дисперсностью 100–400 мкм. Базовыми средами были выбраны вазелиновое масло (ВМ) и жировой гудрон (ЖГ). ЖГ представляет собой смесь жирных кислот в чистом или полимеризованном виде, а также в виде глицеридов и часто используется в качестве основы при разработке наполненных смазок различного назначения [1, 2].

Ранее было установлено [3, 4], что с точки зрения адгезионного взаимодействия с базовыми смазочными средами все исследуемые полимерные материалы можно условно разделить на три группы. К первой группе относятся полимеры, которые не удерживают смазочную среду (ПТФЭ, ПВХ). Во вторую группу входят полимеры, способные удерживать только поверхностный слой смазочной среды определенной толщины (ПЭ, ПП, ПА, ПВБ, ПВС), способные не только удерживать поверхностный слой смазочной жидкости, но и сорбировать ее.

Для оценки степени аномалии вязкости исследуемых полимерсодержащих систем был ис-

+ Автор, с которым следует вести переписку.

пользован критерий Хаггинса  $[\eta]c$  (произведение характеристической вязкости на концентрацию), по которому можно условно судить – является ли данная суспензия «разбавленной» ( $[\eta]c < 1$ ) или «концентрированной» ( $[\eta]c > 1$ ).

Значение характеристической вязкости  $[\eta]$  определяли по формуле Хаггинса [5], в которой сохраняется только линейный по концентрации член:

$$\eta_{пр} = [\eta] + k'[\eta]^2c + \dots,$$

где  $k'$  – константа Хаггинса для ВМ, наполненного полимером, равна 0,5, т. к. методом ИК-спектроскопии не обнаружено хемосорбционного взаимодействия полимера с базовым маслом [3];  $\eta_{уд}$  – удельная вязкость:  $\eta_{уд} = (\eta - \eta_0)/\eta_0$ ,  $\eta_0$  – вязкость дисперсной среды (ВМ);  $\eta_{пр}$  – приведенная вязкость.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Определение критерия Хаггинса для дисперсий полимеров в ВМ показало (таблица), что при одном и том же наполнении ( $\varphi = 0,048$ ) нормальных вязких минеральных масел различными полимерами образуются либо «разбавленные» при введении полимеров первой группы (ПТФЭ, ПВХ), либо «концентрированные» суспензии. Последние образуются с полимерами второй и третьей групп, активно взаимодействующих с базовой средой. Как показано в работах [3, 4] ПЭ и ПТФЭ, в отличие от ПТФЭ, характеризуются способностью образовывать поверхностные адгезионные слои ВМ. Из таблицы видно, что лишь наполнение вазелинового масла ПТФЭ до  $\varphi = 0,111$  приводит к образованию «концентрированной» суспензии.

Изменения сдвигающего напряжения  $\tau$ , при возрастающей или убывающей скорости сдвига  $D$ ,

Параметры суспензий «вазелиновое масло + полимер»

Суспензия	$\varphi$	$c$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta_0$ , Па·с	$\eta_{уд}$	$\eta_{пр} \cdot 10^2$	$[\eta]c$
ВМ + ПТФЭ	0,048	102	0,99	1,68	1,64	1,11
--/+ ПЭ	0,048	46	4,00	9,81	2,10	3,61
--/+ ПТФЭ	0,048	106	0,43	0,16	0,15	0,11
--/--	0,080	176	0,86	1,32	0,75	0,91
--/--	0,111	244	1,48	3,00	1,23	1,61

выявило гистерезис кривых течения (рис. 1). При этом для дисперсии ПТФЭ в ВМ гистерезис кривой течения практически отсутствует даже при значительном объемном содержании полимера ( $\varphi = 0,14$ ), что объясняется отсутствием структурирования в этой системе (рис. 1, кривая 2).

Интересно отметить ярко выраженные перегибы на кривых течения при возрастающей скорости сдвига для систем, в которых дисперсионная среда образует адсорбционно-сольватные слои на частицах полимера (ВМ + ПТФЭ, ВМ + ПЭ, рис. 1, 2). Очевидно, резкое падение напряжения сдвига связано со срывом значительной части адсорбционно-сольватных оболочек, которое, как следует из рис. 2, происходит при одних и тех же значениях скорости сдвига как для систем с различными полимерными наполнителями, так и с различным объемным наполнением. Для суспензий, содержащих ПТФЭ и ПВХ, на поверхности которых по данным ИК-спектроскопии ВМ не образует адсорбционных оболочек, кривые течения монотонно возрастают (рис. 2).

Выявлен тиксотропный характер течения ЖГ (рис. 3а). В связи с этим, введение в ЖГ, обладающий значительным собственным структурированием, полимеров первой и второй групп практически не меняет характер течения (рис. 3б, в). При повторном снятии кривых течения ЖГ, наполненного полимерами первой и второй групп (без временного перерыва, достаточного для восстановления структуры), размер гистерезисной петли значи-

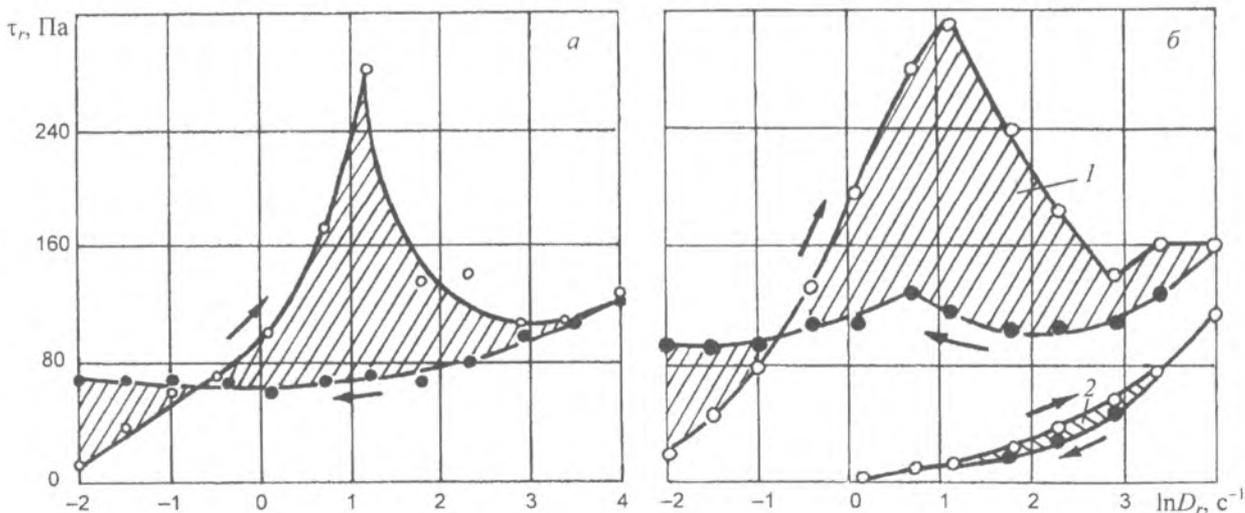


Рис. 1. Кривые течения вазелинового масла, наполненного: а) ПЭ,  $\varphi = 0,048$ ; б) 1 – ПТФЭ,  $\varphi = 0,111$  и 2 – ПТФЭ,  $\varphi = 0,14$  при возрастающей и уменьшающейся скорости сдвига  $D$ ,

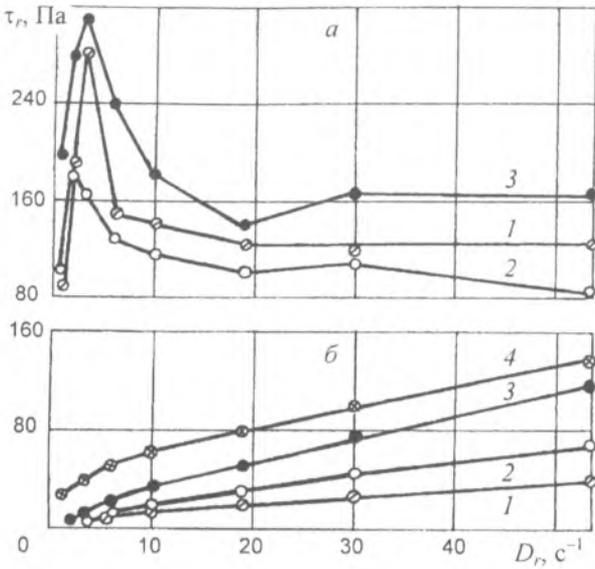


Рис. 2. Кривые течения вазелинового масла, наполненного: а) 1 – ПЭ,  $\varphi = 0,048$  и 2, 3 – ПТФЭ,  $\varphi = 0,08$  и  $0,111$ , соответственно; б) 1, 2, 3 – ПТФЭ,  $\varphi = 0,08$ ,  $0,111$  и  $0,14$ , соответственно; 4 – ПВХ,  $\varphi = 0,14$

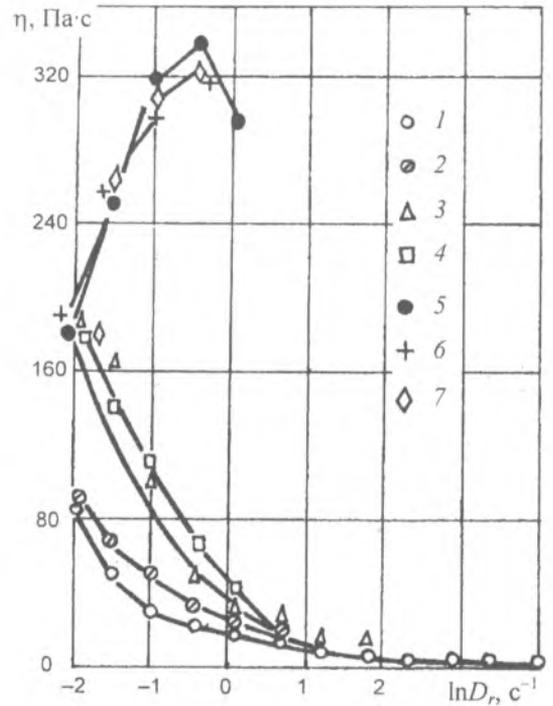


Рис. 4. Зависимость вязкости от скорости сдвига: 1 – жирового гудрона, наполненного 10 мас.%; 2 – ЖГ + 10 мас.% ПТФЭ, 3 – ЖГ + 10 мас.% ПТФХЭ, 4 – ЖГ + 10 мас.% ПВХ, 5 – ЖГ + 10 мас.% ПЭ, 6 – ЖГ + 10 мас.% ПВС, 7 – ЖГ + 10 мас.% ПА

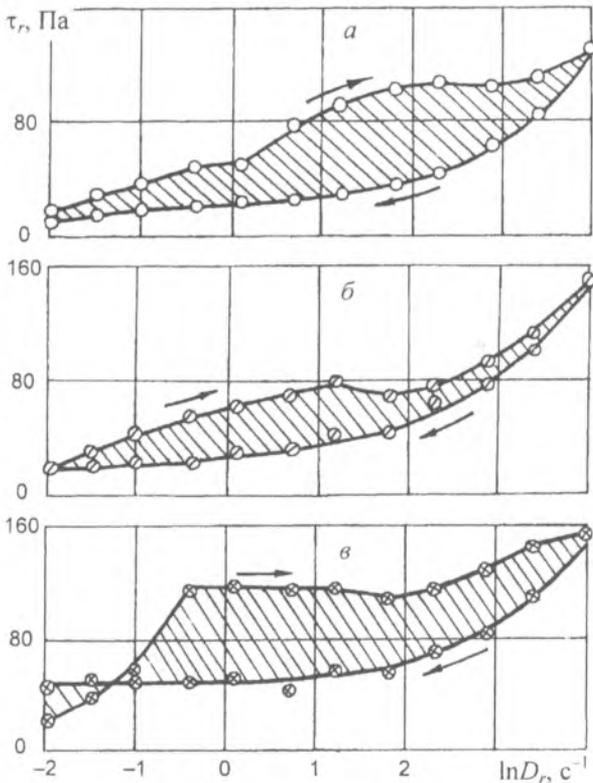


Рис. 3. Кривые течения жирового гудрона: а – без наполнителя; б – наполненного 10 мас.% ПТФЭ; в – 10 мас.% ПТФХЭ

тельно уменьшается. При скоростях сдвига  $D_r > 10 \text{ c}^{-1}$  вязкость суспензий, наполненных полимерами второй группы, равна вязкости самой дисперсионной среды (рис. 4). Введение в ЖГ полимеров первой группы приводит при значительных скоростях сдвига даже к уменьшению вязкости.

В условиях наибольшего нагружения жидкая пленка, относящаяся к обычному тиксотропному типу (рис. 4, кривые 1–4), проявляет наименьшую сопротивляемость утонению. По-видимому, можно ожидать, что дилатантные жидкости (рис. 4, кривые 5–7) могут проявлять улучшенные смазочные свойства. В этой связи значительный интерес представляют смазочные материалы, в которых переход от низкой вязкости к высокой осуществляется бы при значениях скоростей деформации, возникающих в зоне контакта в реальных условиях. Допустимая нагрузка на смазочный слой сильно возросла бы без появления недостатков, связанных с начальной высокой вязкостью смазочного материала.

Установлено, что наполнение ЖГ сорбирующими полимерами (полимерами третьей группы) существенно модифицирует его реологическое поведение – тиксотропная система переходит в дилатантную (рис. 4).

Известно [5], что в зависимости от режима деформирования одна и та же система может проявлять как тиксотропию, так и реопексию. На рис. 5 показано увеличение вязкости полимерсодержащих систем на основе ЖГ во времени при постоянной скорости сдвига.

### Выводы

Таким образом, исследование реологических свойств смазочных материалов, проведенное на ротационном вискозиметре «Реотест-2» в услови-

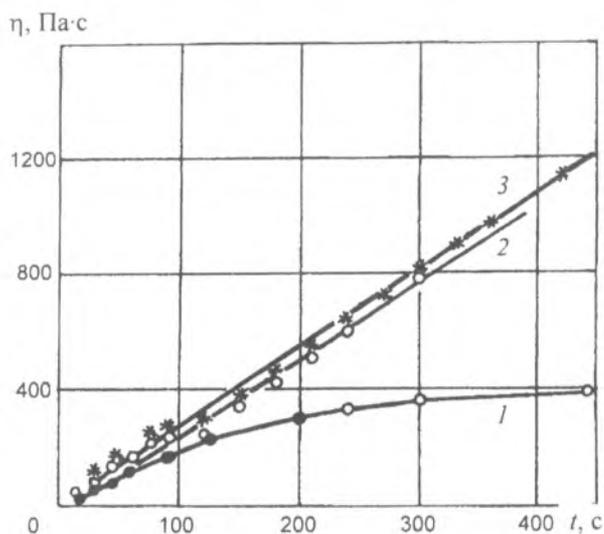


Рис. 5. Увеличение вязкости жирового гудрона, наполненного 10 мас.%. 1 – ПТФЭ, 2 – ПЭ, 3 – ПВХ во времени при постоянной скорости деформирования ( $D_r = 0,13 \text{ c}^{-1}$ )

ях возрастающих и убывающих скоростей деформации, позволило обнаружить аномалии вязкости полимерсодержащих смазочных материалов, ярко выраженную их тиксотропию. Оценивая степень аномалии вязкости исследованных смазочных материалов с помощью критерия Хаггинса установлено, что при одном и том же объемном наполнении нормально-вязких минеральных масел различными полимерами образуются либо «разбавленные» суспензии (ПТФЭ, ПВХ), либо «концентрированные» суспензии (ПЭ, ПА, ПП, ПВХ). «Разбавленные» суспензии характеризуются монотонно возрастающими кривыми течения. У «концентрированных» суспензий наблюдается ярко выраженный гистерезис кривых течения.

Mikhnevich N. N., Pleskachevsky Yu. M., Smurugov V. A.

#### Rheological characteristics of polymer-containing lubricating media.

Rheological properties of bulk polymer-filled lubricant materials were investigated using «Rheotest» viscosimeter. Anomaly in their viscosity and definitely expressed thixotropy were found out. It has been established using Haggins's criterion that depending on surface activity of the polymer either «concentrated» or «diluted» suspensions are formed at base oil filling with polymers. Thixotropic systems after filling with some polymers turn into dilatation or rheopex ones. Dilatation has proved to enhance service characteristics of the lubricating system.

Поступила в редакцию 05.04.99.

© Н. Н. Михневич, Ю. М. Плескачевский, В. А. Смуругов, 1999.

Обнаружен тиксотропный характер течения ряда базовых масел органического происхождения (ЖГ и др.). Наполнение этих базовых сред сорбирующими полимерами (ПЭ, ПВХ, ПВС, ПА,) существенно модифицирует реологическое поведение системы – тиксотропная система переходит в дилатантную и реопексную. Дилатантность является важным свойством смазочных материалов, т. к. в условиях высоких нагрузок дилатантные среды лучше сохраняются в зоне контакта.

#### Обозначения

$\tau_r$  – сдвигающее напряжение;  $D_r$  – скорость сдвига;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $[\eta]c$  – критерий Хаггинса;  $[\eta]$  – характеристическая вязкость;  $\eta_{уд}$  – удельная вязкость;  $\eta_{пр}$  – приведенная вязкость;  $\eta_0$  – вязкость дисперсионной среды;  $\phi$  – объемная концентрация полимера;  $t$  – время;  $k'$  – константа Хаггинса.

#### Литература

1. Золотовицкий Я. М., Шестопапов В. Е., Маркович В. И. Технологические смазки на основе гудронов и дисперсных полимеров для обработки металлов давлением // Трение и износ, 1 (1980), № 4, 669–673
2. Смуругов В. А., Русый В. Х., Шелобод Л. И., Савкин В. Г., Халапсина Т. И. Смазочно-охлаждающая технологическая среда для операций холодной вытяжки труднодеформирующихся металлов // Трение и износ, 17 (1996) № 5, 694–698
3. Михневич Н. Н., Смуругов В. А. Исследование адгезионного взаимодействия в полимерсодержащих смазочных композициях // Трение и износ, 6 (1985), № 4, 627–632
4. Belyj V. A., Sviridenok A. I., Mikhnevich N. N., Smurugov V. A. Adhesion in polymerhaltigen Schmierstoffen und ihr Einfluss auf die Eigenschaften der Grenzschichten // Schmierungstechnik, Berlin (1987), №18, 301–304
5. Энциклопедия полимеров // Под ред. В. А. Каргина, М. С. Акутина, Е. В. Вонского и др. // Москва: Советская энциклопедия, 1 (1972)