

# Материаловедение

11 (248) '2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с февраля 1997 г.

Журнал переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing Ltd." в журнале "Inorganic Materials: Applied Research", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, EI-Compendex, Google Scholar, Health Reference Center Academic, INSPEC, OCLC, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions.

Русскоязычный журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science.

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: машиностроение; химия; металлургия и металловедение; физика.

Редакционная коллегия

Главный редактор

академик РАН К.А. СОЛНЦЕВ

Заместитель главного редактора

чл.-корр. РАН С.М. БАРИНОВ

д-р физ.-мат. наук, проф. А.М. ГЛЕЗЕР

чл.-корр. РАН В.С. КОМЛЕВ

Ответственный секретарь журнала

д-р техн. наук, проф. Г.В. МАЛЫШЕВА

Россия

Белоусов В.В., Бокштейн Б.С., Бузник В.М., Бурханов Г.С., Валиев Р.З., Грановский А.Б., Добаткин С.В., Емельяненко А.М., Иевлев В.М., Исаков Р.С., Калинин Б.А., Калошкин С.Д., Каргин Ю.Ф., Классен Н.В., Ковалевский М.А., Колобов Ю.Р., Котенев В.А., Кущев С.Б., Ладьянов В.И., Мальцев Е.И., Масленков С.Б., Никулин С.А., Огарев В.А., Прокошкин С.Д., Светлов И.Л., Страумал Б.Б., Томилин И.А., Фармаковский Б.В., Фиговский О.Л., Шамрай В.Ф., Шефтель Е.Н.

Зарубежные страны

Беларусь: Витязь П.А., Ильющенко А.Ф.

Германия: Дивинский С., Готтштайн Г., Новиков В.Ю.

Израиль: Гликман Е.Э., Клингер Л.М., Рабкин Е.И.

Канада: Браиловский В.

Латвия: Муктепавела Ф.

США: Витек В., Ройтбурд А.Л., Фарбер Б.Я.

Украина: Гусак А.М., Мильман Ю.В.

Чехия: Пайдар В.

Эстония: Угасте И.

Япония: Виноградов А.

Редактор И.В. Богданова

При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.

Адрес редакции: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

Телефон: (495) 988-98-67. Факс: (495) 988-98-65.

E-mail: admin@nait.ru. Сайт: <http://www.nait.ru>.

© ООО «Наука и технологии», 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

## Структура и свойства материалов

- Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В.* Гистерезис тиксотропии и структурообразование в эластомерных суспензиях . . . . . 3
- Шепелевич В.Г.* Зеренная структура быстрозатвердевшего сплава  $\text{Sn}_{32}\text{Bi}_{52}\text{Pb}_{16}$  . . . . . 9
- Никитин А.Д., Шанявский А.А., Беклемишев Н.Н., Порохов В.В., Барсегян О.С.* Влияние микроструктурных особенностей титановых сплавов на усталостные свойства и механизм зарождения трещин в области сверхмногоциклового усталости . . . . . 12
- Петрушин Н.В., Евгенов А.Г., Заводов А.В., Тренингов И.А.* Структура и прочность жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, полученного методом селективного лазерного сплавления на монокристаллической подложке . . . . . 19

## Современные технологии

- Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Кулевич В.П.* Формирование покрытий на основе алюминидов меди на поверхности алюминия при контактном плавлении . . . . . 27
- Мурзаканова М.М., Борукаев Т.А., Микитаев А.К.* Разработка эффективного способа получения полифениленсульфида . . . . . 32

## Композиционные материалы

- Бреки А.Д., Кольцова Т.С., Скворцова А.Н., Толочко О.В., Александров С.Е., Колмаков А.Г., Лисенков А.А., Гвоздев А.Е., Фадин Ю.А., Провоторов Д.А.* Триботехнические свойства композиционного материала «алюминий—углеродные нановолокна» при трении по сталям 12х1 и шх15 . . . . . 37
- Федотов А.Ю., Баранов О.В., Перелома И.С., Егоров А.А., Смирнов И.В., Зобков Ю.В., Тетерина А.Ю., Комлев В.С.* Формирование микроструктуры и свойства композиционных гелей на основе альгината с антибактериальной активностью . . . . . 43

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

УДК 541.182

## ГИСТЕРЕЗИС ТИКСОТРОПИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ЭЛАСТОМЕРНЫХ СУСПЕНЗИЯХ\*

В.А. НЕЛЮБ, А.С. БОРОДУЛИН, Л.П. КОБЕЦ, Г.В. МАЛЫШЕВА

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

e-mail: malyin@mail.ru

*Предложена методика определения «нормального» и «аномального» гистерезиса, и приведено объяснение формирования двух форм гистерезиса тиксотропии в эластомерных композициях, наполненных порошками различной природы. Сделано допущение, согласно которому в таких системах могут возникать крупные надструктурные элементы — кластеры в составе нескольких частиц наполнителя, коллоидных частиц и дисперсионной среды связующего. Вследствие образования кластеров в системе формируется «нормальный» гистерезис, при их отсутствии — «аномальный». Случай «мгновенной» тиксотропии наблюдается при равенстве скоростей распада и синтеза кластеров. Показано, что смена режимов гистерезиса происходит в зоне инверсии — зоне критических напряжений сдвига, разделяющих поле «напряжение—скорость сдвига» на низко- и высокоскоростную области.*

**Ключевые слова:** гистерезис, псевдопластичность, дилатансия, структура, суспензия, скорость течения, напряжение сдвига, индекс течения.

### Введение

Области применения полимерных композиционных материалов с каждым годом расширяются, что связано с уникальным комплексом их деформационно-прочностных и теплофизических свойств [1–3]. Традиционно в качестве связующего в таких композитах использовали эпоксидные связующие [1, 4], однако в последние годы все большее распространение получают кремнийорганические связующие, которые наряду с хорошими адгезионными свойствами обладают очень высокими деформационными характеристиками. При исследовании реологии кремнийорганических (эластомерных) суспензий, наполненных дискретными углеродными волокнами и железо-углеродными порошками, обнаружен гистерезис тиксотропии, сложным образом зависящий от концентрации наполнителя, химического состава его поверхности, скорости течения [5, 6]. Наряду с так называемой «мгновенной» тиксотропией [7], при которой площадь петли гистерезиса стремится к нулю (рис. 1, кривая 1), скорость ( $\dot{\gamma}$ ) разрушения структуры

может либо превышать скорость ее восстановления («нормальный»/«классический» гистерезис тиксотропии, см. рис. 1, кривая 2), либо уступать скорости этого процесса (гистерезис «аномальный», см. рис. 1, кривая 3). Более того, все три формы гистерезиса могут проявляться на одной скоростной зависимости вязкости  $\lg \eta = f(\dot{\gamma})$ . На эти процессы также оказывают влияние химический состав поверхности наполнителя и его концентрация в суспензии.

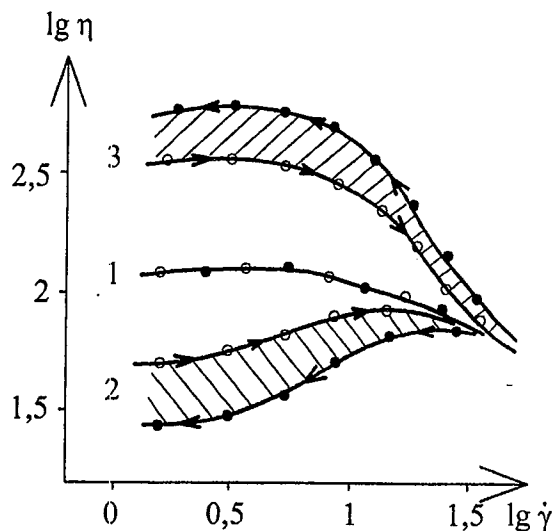


Рис. 1. Типичные кривые гистерезиса тиксотропии эластомерных композиций:

1 — «мгновенная» тиксотропия; 2 — гистерезис «классический»; 3 — «аномальный» гистерезис

\* Результаты настоящей работы получены в рамках проекта по теме «Научные исследования по разработке композиционных материалов со структурой управляемого хаоса и их применение в высокотехнологичном производстве» по заданию № 11.7291.2017/БЧ.

### Объекты и методики

В предлагаемой работе основное внимание уделено дисперсным наполнителям, принципиально отличающимся по коллоидно-химическим признакам поверхности, и их влиянию на характер гистерезиса тиксотропии. Наполнителями были технический углерод (ТУ) с лиофобно-лиофильной поверхностью и порошок карбонильного железа (ЖУ) с лиофильно-лиофобной поверхностью, которые уже изучались в работе [8]. Последний примерно на 70% состоял из железа, на 20% — из углерода и на 10% — из кислорода. Точный элементный состав этих образцов, их геометрический размер, удельная поверхности и плотность приведены в таблице. Связующим служил полиметилфенилсилоксан марки СКТНФ с эластомерными добавками, отверждение которого возможно при комнатной температуре аминным отвердителем.

Реологические свойства изучали на ротационном вискозиметре «Реотест-2» при температуре  $21 \pm 2$  °С и различных скоростях сдвига, измеряя сдвиговые напряжения при последовательном увеличении и уменьшении скорости вращения рабочего цилиндра. Кривые течения обрабатывали по уравнению Освальда—Вейля, рассчитывая индекс течения « $n$ ». Концентрационные зависимости « $n$ » для выбранных образцов, приведенные в [7], были использованы в данном исследовании.

### Обсуждение полученных результатов

На рис. 2 приведены логарифмические зависимости динамической вязкости суспензий, наполненных частицами технического углерода, от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Диапазон содержания наполнителя ( $\chi$ ) в композициях составил 5—25% (мас.), при этом верхний предел ограничивался чрезмерной вязкостью системы. Как и в ранее опубликованных исследованиях этих композиций [7, 8], поле «напряжение—скорость сдвига» состоит из низко- и высокоскоростной областей. Эти области на зависимостях  $\lg \eta = \lg \dot{\gamma}^n$  разграничиваются штриховой кривой 4, обозначающей критические напря-

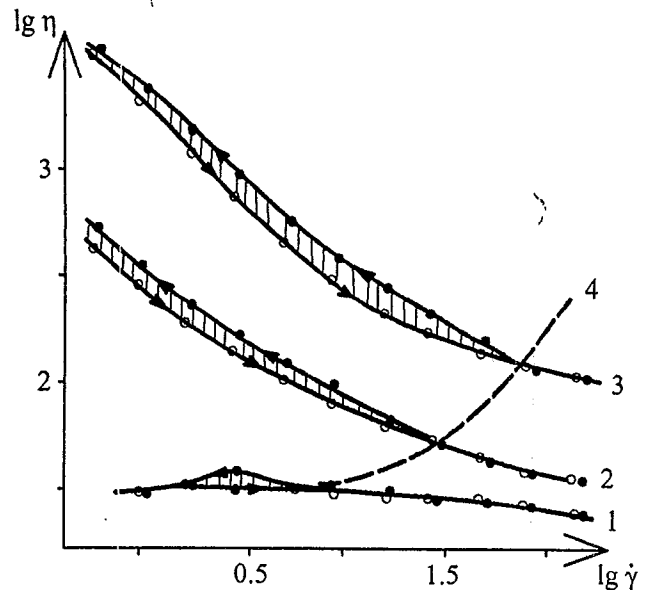


Рис. 2. Кривые изменения вязкости от скорости сдвига эластомерных суспензий, содержащие различное количество технического углерода:

1 — 5; 2 — 10; 3 — 15; 4 — 20; 5 — 25% (мас.)

жения сдвига: слева от нее находится низкоскоростная область, справа — высокоскоростная. Для последней характерна «мгновенная» тиксотропия во всем диапазоне содержаний наполнителя, в то время как в низкоскоростной области — «аномальная» и только в диапазоне  $\chi = 15$ —25% (мас.). По мере роста степени наполнения суспензий увеличивается площадь петли «аномального» гистерезиса и расширяется его скоростной диапазон. Течение данных суспензий протекает преимущественно в псевдопластической области, при этом индекс течения монотонно снижается как в низкоскоростной, так и в высокоскоростной областях. Если экстраполировать концентрационные зависимости  $n$  в сторону увеличения  $\chi$ , они пересекутся при  $\chi_{\max} = 45\%$  (мас.) и  $n_{\min} = 0,012$ . При таком гипотетическом содержании наполнителя исчезает различие между низко- и высокоскоростными значениями индекса течения и этот показатель достигает предельно минимальной величины.

Ранее в [8, 9] была предложена гипотеза, согласно которой в эластомерном связующем, относящемся к квазидилатантным системам, коллоидно-дисперсные частицы, образованные его высокомолекулярной фрак-

### Характеристика порошкообразных наполнителей

Образец	Диаметр, мкм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Элементный состав, (мас.) %		
				С	О	Fe
Технический углерод	0,40	15,0	1900	98,7	0,13	—
Железо-углеродистый порошок	4,30	27,3	3420	19,4	11,2	68,0

цией, под влиянием напряжений сдвига меняют сферическую форму на асимметрическую, палочкообразную. Такая структура в исходном (недеформированном) состоянии показана на рис. 3, а. Интенсивность взаимодействия наполнителя с коллоидными частицами, которые приобрели палочкообразную форму, понижается, как и вязкость суспензии, которая переходит из слабодилатантного состояния в ярко выраженное псевдопластическое.

Чтобы объяснить существование различных форм гистерезиса в эластомерных суспензиях, сделано допущение, согласно которому в этих системах могут возникать крупные надструктурные элементы (кластеры) в составе нескольких частиц наполнителя, коллоидных частиц и дисперсионной среды связующего. Подобная динамическая структура исследуемых суспензий схематически изображена на рис. 3. Отметим некоторые свойства кластеров:

- 1) тип кластера определяется химическим составом и мозаичной структурой поверхности;
- 2) прочность кластера, находящегося в квазистатической форме, обратным образом зависит от его размера;
- 3) кластер обладает ограниченным временем «жизни», которое, как и прочность, обратно его размеру;
- 4) различные по размеру кластеры характеризуются скоростями образования и распада, зависящими от скорости сдвига суспензии;
- 5) кластеры могут взаимодействовать друг с другом, образуя надструктурные элементы второго, третьего и так далее порядков.

При достаточно прочном сцеплении частиц наполнителя в кластере его участие в броуновском движении можно исключить. Следствием такой структурной перестройки является умень-

шение количества свободных частиц наполнителя и соответствующее понижение вязкости системы.

Удельный объем кластера меньше суммы единичных объемов частиц наполнителя, вошедших в его состав, в результате снижения суммарной доли граничных слоев связующего. Этот факт обуславливает дополнительное уменьшение числа свободных частиц наполнителя и соответствующее понижение вязкости. В результате, восстановление структуры (повышение вязкости) будет наблюдаться при меньших скоростях сдвига, формируя «нормальный» гистерезис тиксотропии.

Следовательно, «аномальный» гистерезис характеризует случай полного (или почти полного) отсутствия кластеров в системе. Вообще, с точки зрения кинетики процесса можно утверждать: если скорости образования и распада кластеров равны, реализуется ситуация «мгновенной» тиксотропии; если скорость распада кластеров уступает скорости их синтеза, реализуется «нормальный» гистерезис. При более высокой скорости распада кластеров наблюдается «аномальный» гистерезис.

В предложенной схеме различные формы гистерезиса так или иначе определяются влиянием кластеров на вязкость системы, зависящим от продолжительности их существования в дисперсной системе, которая обладает различными структурами на микро- и мезоуровнях.

С этих позиций становится понятным реологическое поведение образцов СКТНФ/ЖУ с различным содержанием наполнителя, кривые изменения вязкости которых представлены на рис. 4. В низкоскоростной области (слева от штриховой кривой 5) суспензии, содержащие 10% (мас.) порошка, обладают «мгновенной» тиксотропией, а содержащие 35% (мас.) — «нормальным» гистерезисом. Важно отметить, что кривая критических напряжений сдвига (см. рис. 4, кривая 5), как и на рис. 2, проходит через все точки инверсии, в которых происходит смена одного режима гистерезиса другим: на кривой 2 ( $\chi = 35\%$  (мас.)) — «нормального» гистерезиса «мгновенной» тиксотропией, на кривых 3 ( $\chi = 50\%$  (мас.)) и 4 ( $\chi = 60\%$  (мас.)) «аномального» — «нормальным».

Фактически кривая 5 (см. рис. 4) делит систему на две части по признаку устойчивости кластеров. Следуя нашей

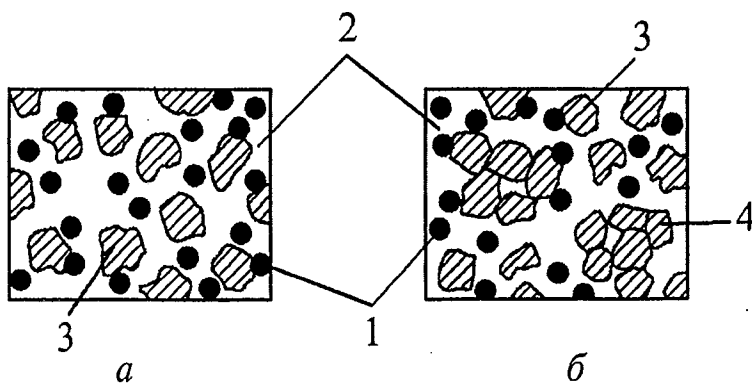


Рис. 3. Схематическое изображение суспензии в исходном состоянии (а) и после образования кластеров (б):

1 — коллоидно-дисперсные частицы связующего; 2 — дисперсионная среда; 3 — частицы наполнителя; 4 — кластеры

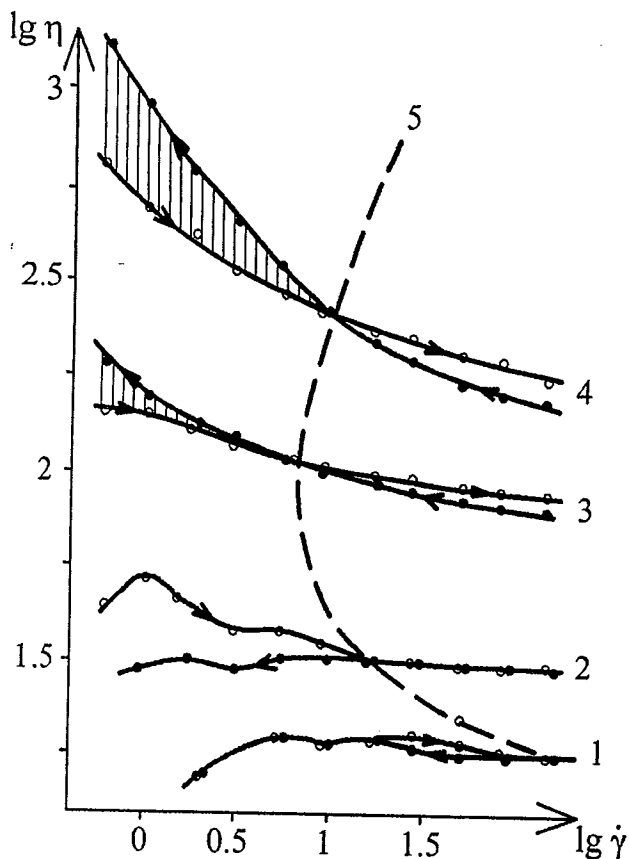


Рис. 4. Кривые изменения вязкости суспензий СКТНФ/ЖУ от скорости сдвига при различном содержании наполнителя: 1 — 10; 2 — 35; 3 — 50; 4 — 60; 5 — кривая критических напряжений сдвига

схеме, в суспензиях, содержащих 50–60% (мас.) железуглеродистых наполнителей (см. рис. 4 кривые 3 и 4), в области малых скоростей сдвига кластеров нет. При  $\dot{\gamma} = 8\text{--}10\text{ с}^{-1}$  скорость их синтеза начинает превышать скорость разрушения и устойчивые кластеры ощутимых размеров начинают накапливаться в системе. Этот процесс протекает плавно с постепенным нарастанием их концентрации. Устойчивые кластеры, которые появляются при достижении точек инверсии, должны иметь малые размеры и плавно нарастающую концентрацию по мере роста скорости сдвига. Если в зоне инверсии происходит образование крупных кластеров, то они при повышении скоростей деформации дробятся до более устойчивых размеров.

Скорость сдвига может выступать в качестве фактора, не только разрушающего кластеры, но и способствующего их синтезу, например, стимулирующего сближение частиц наполнителя на расстояние эффективного взаимодействия и наиболее выгодную ориентацию по отношению друг к другу.

Наиболее крупные кластеры должны возникать на начальном этапе в суспензии с 35% же-

лезуглеродистого наполнителя (см. рис. 4, кривая 2). Судя по площади петли гистерезиса, начальная концентрация кластеров должна быть высокой. Нелинейная форма кривой вязкости свидетельствует о сложной взаимосвязи структуры с кинетикой процесса деформирования: с увеличением скорости сдвига размеры кластеров в ней уменьшаются и по достижении точки инверсии становятся постоянными, о чем свидетельствует появление «мгновенной» тиксотропии. При содержании железуглеродистых частиц 10% (мас.) (см. рис. 4, кривая 1), количество кластеров практически постоянно во всем диапазоне измеренных скоростей сдвига.

В низкоконцентрированных составах с 5% (мас.) технического углерода (см. рис. 2) «мгновенный» гистерезис обнаруживается практически во всем диапазоне скоростей сдвига. У более концентрированных составов «аномальный» гистерезис с полным отсутствием кластеров проявляется в низкоскоростной области. Последние возникают по достижении инверсии в высокоскоростной области (см. рис. 2, кривые 2 и 3). Из анализа кривых на рис. 2 видно, что с увеличением степени наполнения низкоскоростная область гистерезиса смещается вправо, сужая зону «мгновенной» тиксотропии. Поскольку площадь петли «аномального» гистерезиса для этой системы практически постоянна и мала, кластеры, сформированные из частиц технического углерода в зонах «мгновенной» тиксотропии, имеют меньший размер по сравнению с железуглеродными и в силу этого более прочны.

Из зависимостей  $n = f(\chi)$  видно, что высокоскоростное течение суспензии СКТНФ/ЖУ в диапазоне  $\chi = 10\text{--}60\%$  (мас.) строго ньютоновское. В области низких скоростей при  $\chi \leq 10\%$  (мас.) проявляется слабая дилатантность ( $n \leq 1,38$ ). В диапазоне  $\chi = 10\text{--}40\%$  (мас.) наблюдается ньютоновское течение, при большем содержании — псевдопластическое с индексом  $n = 0,56$  при  $\chi = 60\%$  (мас.). Появление устойчивых кластеров определяет характер псевдопластического течения суспензий в высокоскоростной области сдвиговых деформаций.

Подводя итог анализу течения исследованных суспензий, можно констатировать, что образование зон аномального гистерезиса возможно при условии очень слабого взаимодействия между частицами наполнителя. В особенности это относится к суспензиям на основе технического углерода (см. рис. 2). Вероятно, его ча-

стицы испытывают по отношению друг к другу силы отталкивания, которые усиливаются с ростом концентрации частиц. Лишь для суспензий, содержащих не более 5% (мас.) технического углерода, отталкивание компенсируется увеличением межчастичного расстояния. В случае с суспензией с железоуглеродными частицами (см. рис. 3) силы притяжения превалируют. Подобный эффект особенно заметен у составов, содержащих 50 и 60% (мас.) наполнителя. Вполне вероятно, что вклад в межчастичное взаимодействие вносит слабое магнитное притяжение железных фрагментов в частицах наполнителя. Магнитные силы при высокой концентрации магнитных элементов должны мешать образованию кластеров. Это подтверждается «аномальным» гистерезисом высоконаполненных образцов в низкоскоростной области сдвига (см. рис. 4, кривые 3 и 4). Магнитная ориентация железных частиц наполнителя, эффективная при малых скоростях сдвига, при более высоких скоростях нарушается и становится малозаметной в зоне инверсии. За ее пределами с увеличением скорости деформации кластеры в данной системе приобретают устойчивость.

Межмолекулярное (ван-дер-ваальсовое) взаимодействие дисперсных частиц наполнителя в объеме кластера обусловлено «мозаичным» строением их поверхности. Наглядное изображение такой поверхности лиофильно-лиофобного (I) и лиофобно-лиофильного типов (II) показано на рис. 5. В основу представлений о таких поверхностях положен коллоидно-химический принцип, при котором одна из фаз выполняет функцию непрерывной (дисперсионной) среды, другая — дисперсной фазы.

Такой подход отражает реальный процесс структурообразования твердотельных наполнителей. Их основу составляет непрерывная матричная фаза, в которой распределены изоли-

рованные микро- и нановключения. Например, в синтетических волокнах (полиакрилонитрильных, углеродных) функцию последних выполняют фибриллы, распределенные в аморфной матрице, в стеклянных — кристаллические дисперсные элементы, «армирующие» однородную стеклообразную матрицу в виде застывшего расплава [7].

В случае поверхности типа I дисперсионная среда (матрица) определяет лиофильно-лиофобное строение «мозаики», в случае II — лиофобно-лиофильное. При таком подходе изменения концентрации фаз, формы и размеров их элементов способны обусловить все многообразие структур и свойств поверхности дисперсных наполнителей. При непосредственном и, возможно, «мгновенном» контакте их частиц лиофильные участки железа реагируют с лиофобными (углерод). В нашем случае взаимодействие частиц технического углерода с частицами железа усиливает находящиеся на поверхности последнего кислородсодержащие функциональные группы (см. таблицу). При этом связывание дисперсных частиц в кластере или, наоборот, их диссоциация протекают во взаимодействии с дисперсионной средой связующего, которая выполняет не только функцию смазки, но и непрерывной полимерной матрицы, обеспечивающей монолитность будущего композитного изделия.

### Заключение

Исследованы различные формы гистерезиса тиксотропии в эластомерных суспензиях, наполненных железным и углеродным порошками. Оба наполнителя, обладающие лиофильно-лиофобными (железо) и лиофобно-лиофильными (углерод) поверхностями, образуют с эластомерным связующим типичные псевдопластические или ньютоновские системы с индексом течения (по Освальду—Вэйлю) в диапазоне 1—0,22.

Для объяснения различных форм гистерезиса тиксотропии в таких суспензиях сделано допущение, по которому в этих системах могут возникать надструктурные элементы — кластеры в составе нескольких частиц наполнителя, коллоидных частиц и дисперсионной среды связующего. Перечислены некоторые свойства, которыми должны обладать кластеры. Наиболее важны-

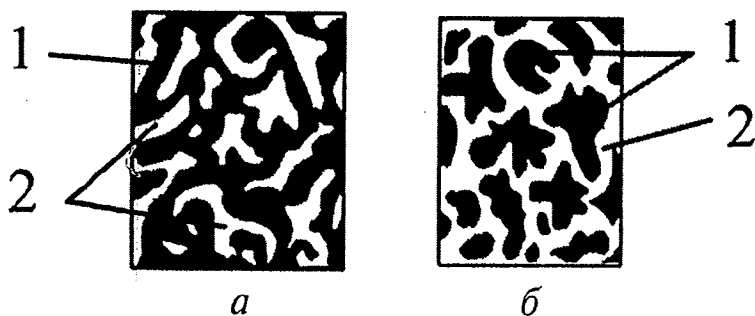


Рис. 5. Схематическое изображение лиофильно-лиофобной (а) и лиофобно-лиофильной (б) твердых частиц наполнителей: 1 — лиофильные; 2 — лиофобные участки

ми из них являются прочность и ограниченное время «жизни», обратным образом зависящие от их размеров. В предложенной схеме различные формы гистерезиса определяются влиянием кластеров на вязкость системы. Так, вследствие образования кластеров уменьшается количество свободных частиц, вязкость суспензии понижается и восстановление структуры (повышение вязкости), отражающей обратный ход течения, наблюдается при меньших скоростях сдвига, формируя «нормальный» гистерезис тиксотропии. Следовательно, «аномальный» гистерезис относится к случаю отсутствия кластеров, а случай «мгновенной» тиксотропии наблюдается при равенстве скоростей их распада и синтеза.

Установлено, что кривая критических напряжений сдвига, разделяющая поле «напряжение—скорость сдвига» в исследованных суспензиях на низко- и высокоскоростную области, проходит через все точки инверсии на кривых течения, в которых наблюдается смена одного режима гистерезиса другим.

Сделана попытка объяснить межмолекулярное взаимодействие дисперсных частиц в кластере с позиций «мозаичного» строения их поверхности. Дана схема такой «мозаики» у твердотельных наполнителей, разделенная на два типа, в основу которых положен коллоидно-химический принцип: одна из фаз представляется непрерывной, другая в ней диспергирована. Такая схема позволяет описать все многообразие структур и характеристик наполнителей. Например, в исследованных суспензиях обра-

зование устойчивых кластеров, вероятнее всего, происходит в результате непосредственного контакта лиофильных участков поверхности соседних частиц с лиофобными.

Синтез кластеров, снижающих вязкость дисперсно-наполненной системы в широком диапазоне скоростей способен уменьшить энергетические и временные затраты на операциях перемешивания. Введение кластеров в дисперсную систему способно повысить производительность труда при напылении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баурина Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин. Уч. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
2. Баурина Н.И., Зорин В.А., Приходько В.М. Описание процессов деградации свойств материалов с использованием аппарата теории катастроф // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 11. С. 14—19.
3. Татарников О.В. Трехуровневое проектирование пространственно-армированных композитных конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 7. С. 21—26.
4. Татарников О.В., Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Морозов Б.Б. Конечно-элементное моделирование теплового режима автоклавного отверждения трехслойной панели // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 8. С. 32—35.
5. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Capillary hydrodynamics of oligomer binder // Polymer Science — Series D. 2016. V. 9. No 3. P. 322—325.
6. Nelyub V.A. Determination of adhesion interaction between carbon fiber and epoxy binder // Polymer Science — Series D. 2015. V. 8. No 1. P. 6—8.
7. Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В. Гистерезис вязкости в наполненных силоксановых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 8. С. 25—29.
8. Кобец Л.П., Бородулин А.С. Реологические свойства системы полимерное связующее-дискретный металлический наполнитель // Энциклопедия инженера-химика. 2015. № 6. С. 9—14.
9. Кобец Л.П., Малышева Г.В., Бородулин А.С. Реологические свойства системы эластомерное связующее-дискретное углеродное волокно // Материаловедение. 2015. № 5. С. 47—51.

## ВНИМАНИЕ!

В связи с участвовавшими случаями распространения контрафактной продукции и невыполнения договорных обязательств со стороны некоторых подписных агентств убедительная просьба оформлять подписку только в рекомендуемых агентствах (список агентств приведен ниже). Также напоминаем, что все журналы, выпускаемые ООО «Наука и технологии», снабжены голограммой на первой сторонке обложки. При отсутствии голограммы просьба незамедлительно сообщать об этом в издательство по тел. (495)223-09-10 или e-mail: market@nait.ru.

#### Рекомендуемые подписные агентства:

ООО «УРАЛ-ПРЕСС», ООО «АГЕНТСТВО «КНИГА-СЕРВИС», ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА», ООО «ИНФОРМНАУКА».