

Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов.

Уменьшаются минимальная и максимальная глубины залегания зерна с увеличением массы иона, а также незначительно уменьшаются объёмы зерна. Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвёрдость, предел текучести, предел прочности, повышается также коррозионная стойкость, при этом увеличивается способность воспринимать ударные нагрузки за счёт снижения модуля упругости. Проведя эти расчёты, выберем последовательность слоёв: на поверхности должен быть слой из соединения, имеющего минимум адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом. Остальные слои располагаются с учётом требуемого режима работы РИ (обработка высокопрочных и закалённых сталей; характер резания: непрерывный, прерывистый и др.). Силициды успешно работают при высоких температурах, и поверхностный слой из силицидов будет особенно полезен, при высоких температурах в зоне резания. В этом случае этот слой должен быть на поверхности, а значит, выбираем вариант с энергией ионов? соответствующий минимальной глубине залегания близкой к нулю.

Литература

1. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation / J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 560. – Pp. 1–9.
2. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокровтиями и наноструктурными модифицированными слоями : моногр.-справочник : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – Харьков : Планета-Принт, 2016. – Кн. 1: Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУСПЕНЗИЙ ВО ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Коробко Е. В.¹, Ройзман В. П.², Новикова З. А.¹, Харламова И. М.¹

*¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, e-mail: evkorobko@gmail.com*

²Хмельницкий национальный университет

Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11, e-mail: royzman-v@mail.ru

Введение. Электрореологический эффект (ЭР-эффект) представляет собой быстрое обратимое существенное изменение реологи-

ческих свойств жидкотекучих суспензий поляризуемых мелкодисперсных частиц в диэлектрической дисперсионной среде при воздействии электрического поля за счет структурирования частиц дисперсной фазы.

Увеличение вязкости за счет структурных перестроек, названное “электровязким эффектом”, было впервые установлено американским инженером В. Винслоу [1]. Многочисленные комплексные исследования зависимости электровязкого, позже получившего название “электрореологического” эффекта от концентрации частиц дисперсной фазы, скорости сдвига, напряженности и частоты электрического поля были проведены Д. Клаасом и Т. Мартинеком [2]. Они выяснили, что жидкости активны, если диэлектрические частицы абсорбируют некоторое количество влаги или ПАВ. Ранние попытки описания природы ЭРЭ в гидросодержащих суспензиях основывались на учете эффектов “влаги” и роли двойного электрического слоя [3]. Однако, как показали экспериментальные данные, классическая теория двойного электрического слоя не давала объяснения тому, что максимального ЭРЭ удавалось достичь лишь при некотором оптимальном содержании абсорбированной воды, и он отсутствовал в безводных дисперсиях [4]. Формирование двойного электрического слоя в суспензиях без каких-либо полярных добавок представляется сомнительным. Дисперсионная среда – диэлектрические жидкости, чаще всего масла, не являются хорошими растворителями для электролитических компонентов, и даже если и присутствует некоторое количество неводных электролитов, то и в них невозможно индуцирование противоположно заряженных ионов. Эти аргументы способствовали разработке диэлектрической поляризационной модели [5], в соответствии с которой основной вклад в поляризацию частиц должна давать разница диэлектрических констант дисперсной фазы и дисперсионной среды, т. е. следовало ожидать гигантского эффекта в сегнетоэлектриках. Однако реологические исследования электрореологических жидкостей (ЭРЖ) на основе частиц титаната бария и других показали, что они слабо активны в переменном электрическом поле [6], неактивны в постоянном электрическом поле [7] и откликаются на электрическое воздействие лишь после адсорбирования некоторого количества влаги. Эти несоответствия и количественные расхождения данных теоретических предсказаний с экспериментальными результатами заставили исследователей предположить, что классическая диэлектрическая поляризационная модель не может объяснить физическую природу ЭРЭ.

Позже П. Аттеном была предложена кондукционная модель [8], модифицированная другими исследователями [9]. В развитие этой модели Б. Хусид и А. Акривос теоретически показали [28], что она учитывает только взаимодействие частиц и не учитывает динамику струк-

турного процесса в ЭРЖ под действием электрического поля. Экспериментальные результаты [10] подтвердили релаксационный характер процессов поляризации в ЭРЖ.

В последние два десятилетия теоретические и экспериментальные исследования по выяснению механизма ЭРЭ проводятся в США, Великобритании, Франции, Японии, КНР. Мировую известность получили результаты научных исследований Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси [11]. В частности, показана ошибочность прямого применения классических диэлектрических подходов, не учитывающих следующего:

1) частицы дисперсной фазы в большинстве случаев – это “плюхие” диэлектрики, обладающие конечной проводимостью;

2) искусственное разделение двух составляющих поляризационного процесса – кондукционной и диэлектрической приемлемо лишь для упрощенных теоретических построений, но не характеризует поведение реальных ЭРЖ;

3) на поляризационные механизмы значительное влияние должна оказывать молекулярная и кристаллическая структура материала дисперсной фазы.

Необходимо отметить, что в связи с многофакторностью (разнообразные материалы компонентов, температура, различные сдвиговые условия, частота и величина электрического воздействия) и сложностью процессов поляризации в неидеальных диэлектрических дисперсиях ни одна из известных ныне теорий не в состоянии дать строгого объяснения структурным процессам в ЭРЖ и предсказать величину их электрореологического отклика.

Поляризация диэлектрика – это возникновение в нем собственного электрического поля, обусловленного смещением зарядов, входящих в его материал. Различают *молекулярную* поляризацию, которая подразделяется на *ориентационную* поляризацию диэлектрика, связанную с поворотом осей жестких диполей, и *деформационную*, представляющую собой электронную поляризацию или ионную в диэлектрике с неполярными молекулами. Помимо собственной поляризации материала дисперсных частиц, находящихся в диэлектрической жидкости, важна *межфазная* поляризация, связанная с появлением двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела фаз с дисперсионной средой. Мерой молекулярной поляризации диэлектриков является вектор поляризации $\vec{P} = \lim_{v \rightarrow 0} \left(\frac{I}{V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_i \right)$, где n – число диполей-молекул в объеме V ; \vec{p}_i – дипольный электрический момент i -й молекулы.

Поляризованные в поле частицы твердой фазы ЭРЖ, в электрическом смысле представляющие собой диполи, взаимодействуют

друг с другом, образуя агрегаты и мостичные структуры, вытянутые вдоль вектора напряженности. Поляризационная составляющая силы, действующей на отдельную частицу, определяется как $F = P \operatorname{grad} E$, где P – индуцированный дипольный момент, E – напряженность поля поляризованной частицы. В приближении точечного диполя величина и знак индуцированного дипольного момента P зависят от диэлектрических проницаемостей и проводимостей частиц дисперсной фазы и дисперсионной среды, характеристик двойного электрического слоя частиц и величины напряженности поля E [12].

Поскольку перенос свободных зарядов (ионов) как в зазоре конденсатора (электрофорез), так и в пределах ДЭС или по поверхности частицы происходит за реальное время, то и поляризация зависит от временного фактора. Следовательно, диэлектрическая проницаемость ε является комплексной величиной, составляющие которой дают различный вклад в процесс поляризации при воздействии электрических полей разной частоты. Комплексная диэлектрическая проницаемость определяется как

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \bar{\varepsilon} + 4\pi\sigma / i\omega, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – значение диэлектрической проницаемости при постоянном напряжении.

Дипольный момент для простейшего случая – незаряженная шарообразная частица радиусом a с диэлектрической проницаемостью ε_p , в непроводящей диэлектрической жидкости ε_f в однородном электрическом поле – равен $\bar{P} = \beta \varepsilon_0 \varepsilon_p a^3 E$, где $\beta = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_f}{\varepsilon_p + \varepsilon_f}$, – дипольный

коэффициент частицы, или, иначе, мера ее поляризуемости относительно жидкости. В общем случае дипольный коэффициент обусловлен электронной, ионной и дипольной составляющими: $\beta = \beta_a + \beta_e + \beta_g$. Если

$\varepsilon_p = \varepsilon_f$, то два вещества поляризуются до одного уровня и на поверхности раздела твердого тела и жидкости не появляются заряды. Если $\varepsilon_p > \varepsilon_f$, то на поверхности частиц появляется избыток связанных зарядов и на расстоянии они действуют как точечный диполь с моментом \vec{p}_i .

Разработками ученых последних десятилетий показано, что ориентация частиц под действием внешнего электрического поля с образованием мостичных структур может быть связана не только с наведенным, но и с постоянным дипольным моментом. Дипольная структура замечена у коллоидных частиц глинистых суспензий, суспензий красителей [13]. Спонтанная поляризация обнаружена в жидких кристаллах [14].

В [15] также показано, что большая разница в значениях диэлектрических проницаемостей дисперсной фазы ϵ_p и дисперсионной среды ϵ_f способствует увеличению ЭР-эффекта в безводных ЭРЖ (наполнитель: частицы керамики – титанаты бария BaTiO_3 и стронция SrTiO_3 , дисперсионная среда – додекан ($\epsilon_f = 2$, $\sigma = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$).

Теоретические исследования последних лет полагают, что диэлектрическая поляризация обусловлена сочетанием проводимости и диэлектрическими потерями как частиц дисперсной фазы, так и диэлектрической среды, что определяет увеличение напряжения сдвига ЭРЖ в электрическом поле [16]. F. Iwakaki, A. Kawai и др. [17] экспериментально исследовали связь диэлектрических свойств с ЭР-эффектом ЭРЖ как с водосодержащей дисперсной фазой, так и безводной. Они пришли к выводу, что для получения высокоэффективных ЭРЖ они должны обладать высокой межфазной поляризацией, т.е. частота релаксации находится в интервале 10^2 – 10^5 Гц.

Создание новых составов ЭРЖ требует не только использования высокоэффективного наполнителя, но и подбора дисперсионной среды обеспечивающей наибольшее увеличение реологических параметров ЭРЖ при воздействии электрического поля. Целью данной работы является определение влияния типа дисперсионной среды на диэлектрические характеристики ЭРЖ (ϵ' и ϵ'') и изменение реологических параметров ЭРЖ (напряжение сдвига τ) при воздействии электрического поля.

Экспериментальные результаты. Дисперсной фазой ЭРЖ служили электрочувствительные мелкодисперсные частицы TiO_2 , модифицированного ионами Al^{3+} , имеющие кристаллическую структуру “анатаз” с размером кристаллов 8–12 нм. Удельная площадь поверхности полученного композиционного материала $S_{\text{уд}} = 60$ – $100 \text{ м}^2/\text{г}$. Ранее проведенные исследования показали высокую ЭР-активность полученной дисперсной фазы [18]. В качестве дисперсионной среды использовали синтетические жидкости – полиметилсилоксан ПМС-100 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,72$, вязкость $\eta = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$), сложный эфир полиолов (ПОЭ) марки Mobil ($\epsilon = 3,55$, $\eta = 0,055 \text{ Па} \cdot \text{с}$) и минеральные – трансформаторное масло ($\epsilon = 2,2$, $\eta = 0,017 \text{ Па} \cdot \text{с}$), вакуумное масло ВМ-3 ($\epsilon = 2,3$, $\eta = 0,024 \text{ Па} \cdot \text{с}$). Исследуемые образцы ЭРЖ содержали 20 вес.% дисперсной фазы в различных дисперсионных средах.

ЭР-активность образцов ЭРЖ определялась по изменению напряжения сдвига τ в зависимости от напряженности электрического поля при помощи ротационного вискозиметра с использованием измерительной ячейки, состоящей из двух коаксиальных цилиндров с зазором 1 мм. Задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра, опре-

деляющая скорость сдвига в жидкости. Напряженность приложенного электрического поля E изменялась в интервале 0–3,5 кВ/мм, скорость сдвига $\dot{\gamma} = 17,1 \text{ с}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Параллельно определялась плотность тока j , мкА/см².

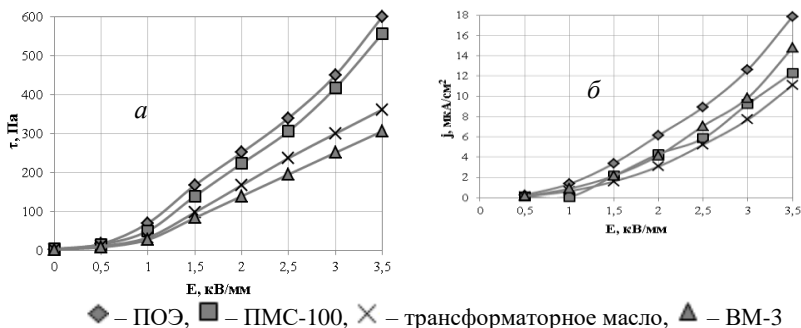


Рис. 1. Зависимости напряжения сдвига (а) и плотности тока (б) ЭРЖ, содержащих 20 % $\text{TiO}_2+7\%\text{Al}$, от напряженности электрического поля в различных дисперсионных средах (скорость сдвига $17,2 \text{ с}^{-1}$)

Диэлектрические характеристики ЭРЖ определялись с использованием трехэлектродной ячейки и измерителя иммитанса E7-20 в диапазоне частот $f = 0,01-1000 \text{ кГц}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 1 представлены зависимости напряжения сдвига и плотности тока ЭРЖ, содержащих 20 вес% $\text{TiO}_2+7\%\text{Al}$, от напряженности электрического поля в различных дисперсионных средах при скорости сдвига $17,2 \text{ с}^{-1}$. Все образцы ЭРЖ проявляют высокий ЭР-эффект, напряжение сдвига ЭРЖ увеличивается более чем на два порядка при напряженности электрического поля $E = 3,5 \text{ кВ/мм}$, при этом величина плотности тока $j < 20 \text{ мкА/см}^2$. ЭРЖ на основе ПОЭ проявляет наибольший ЭР-эффект – напряжение сдвига увеличивается более чем в 200 раз.

На рис. 2 представлены зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' компоненты диэлектрической проницаемости ЭРЖ, содержащих 20 вес% $\text{TiO}_2+7\%\text{Al}$, от частоты электрического поля в различных дисперсионных средах.

Все образцы ЭРЖ обладают межфазной поляризацией, т.к. частота релаксации $f_{\text{рел}} \sim 10^3 \text{ Гц}$. Наибольшее значение ($\epsilon''_{\text{рел}} = 0,5$) характерно для ЭРЖ на основе ПОЭ. Величина поляризации определяемая значением $\Delta\epsilon'$ наибольшая у ЭРЖ на основе ПОЭ ($\Delta\epsilon' = \epsilon'_{10^3\text{Гц}} - \epsilon'_{10^5\text{Гц}} = 1,7$).

Для ЭРЖ на основе ПМС-100 $\epsilon''_{\text{рел}} = 0,31$, $\Delta\epsilon' = 1,2$; на основе транс-

форматорного масла $\varepsilon''_{фрел} = 0,25$, $\Delta\varepsilon' = 0,9$; на основе ВМ-3 $\varepsilon''_{фрел} = 0,21$, $\Delta\varepsilon' = 0,8$.

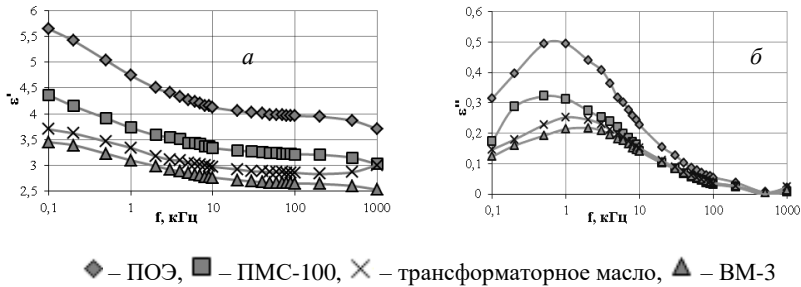


Рис. 2. Зависимости действительной ε' (а) и мнимой ε'' (б) компоненты диэлектрической проницаемости ЭРЖ, содержащих 20 % $\text{TiO}_2+7\%\text{Al}$, от частоты электрического поля в различных дисперсионных средах

Большую величину межфазной поляризации ЭРЖ обеспечивает дисперсионная среда ПОЭ, имеющая большее значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 3,55$.

Выводы. Результаты экспериментального исследования показали, что образцы ЭРЖ, содержащие электрочувствительные мелкодисперсные частицы TiO_2 , модифицированные ионами Al^{3+} , имеющие кристаллическую структуру “анатаз”, обладают высоким ЭР-эффектом. Использование ПОЭ с большим значением диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 3,55$ в качестве дисперсионной среды позволяет усилить межфазную поляризацию и тем самым увеличить ЭР-эффект, что определяет особенности поляризации рассмотренных компонентов ЭРЖ.

Литература

1. Patent 2417850 USA / W. M. Winslow. (1947).
2. Klass D. L. and Martinek T. W. J. Appl. Phys. 38, 67 (1967).
3. Stangroom G. Electrorheological Fluids // J. Phys. Techn. No. 14. Pp. 290–296 (1983).
4. Block H., Kelly J. P. Proc. IEE Colloq. No. 14. Pp. 1–11 (1985).
5. Davis L. C. J. Appl. Phys. 72, 1334 (1992).
6. Garuino T., Adolf D., Hance B. Proc. of the Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Mechanisms, Properties, October 15–16, 1991 Carbondale, Illinois, USA. Ed. R. Tao. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pp. 167–174 (1992).

7. Otsubo Y., Watanabe K. J. Soc. Rheol. Japan. No. 18 (1990).
8. Atten P., Foulc J.-N., Felici N. Int. J. Mod. Phys. B. No. 8. Pp. 2731–2745 (1994).
9. Wu C. W. and Conrad H. J. Appl. Phys. 83, 3880 (1998).
10. Wen W., Ma H., Tam W. Y. and Sheng P. Phys. Rev. E 55, R61294 (1997).
11. Электрореологический эффект / под ред. А. В. Лыкова. Минск: Наука и техника (1972).
12. Landau L. D., Lifshitz L. P. Electrodynamics of Continuous Media. Oxford : Pergamon Press (1983).
13. Алексеев О. Л. Автореф. дис. ... канд. хим. наук / О. Л. Алексеев. – Киев (1963).
14. Чистяков И. Г. Жидкие кристаллы / И. Г. Чистяков. – Москва : Наука (1966).
15. Lan Y. C., Xu X. Y., Men S. Q. and Lu K. Q. Appl. Phys. Lett. 73, 2980 (1998).
16. Parthasarathy M., Klingenberg D. J. Mater. Sci. Eng. 17, 57 (1996) Ikazaki F., Kawai A. et al J. Phys. D Appl. Phys. 31, 336 (1998).
17. Ikazaki F., Kawai A. et al J. Phys. D Appl. Phys. 31, 336 (1998).
18. Murashkevich A. N., Alisienok O. A., Zharskii I. M., Korobko E. V., Novikova Z. A. Colloid Journal 79, 87 (2017).

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ МЯГКОЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Коробко Е. В.¹, Баитовая Е. А.¹, Барташевич А. А.², Игнатович Л. В.²

¹*Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
г. Минск, ул. Петруся Бровки 15, тел. 375172841361, evkorobko@gmail.com*

²*Белорусский государственный технологический университет
г. Минск, ул. Свердлова 13-а, тел. 375293474437, lignatovich6@gmail.com*

В строительстве и мебельном производстве в большом объеме используются композиционные материалы, в частности фанерные изделия общего назначения с наружными слоями из шпона древесины лиственных и хвойных пород. В мебели фанера применяется для изготовления щитовых конструктивных элементов, ящиков и других деталей, в строительстве – для устройства опалубок, оборудования транспортных объектов, интерьеров, при изготовлении паркетных изделий, и др.