

PACS numbers: 47.61.-k, 62.23.Pq, 81.20.Fw, 82.70.Gg, 83.60.Np, 83.80.Gv, 83.80.Hj

Электроструктурирующиеся дисперсии наноразмерных наполнителей для создания адаптивных композитов

Е. В. Коробко, А. П. Достанко*, А. О. Коробко*, В. П. Ройзман**,
З. А. Новикова, Н. А. Журавский, А. И. Глоба***

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15,
220013 Минск, Беларусь*

**Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6,
220013 Минск, Беларусь*

***Хмельницкий национальный университет,
Институтская ул., 11,
29000 Хмельницкий, Украина*

****Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13^а,
220006 Минск, Беларусь*

Представлены результаты исследования реологических свойств дисперсий на основе синтезированных золь–гель-методом наноразмерных частиц диоксида титана, гибридного материала диоксид титана–карбоксиметилцеллюлоза и гидратированного оксида железа в электрическом поле. Определены кривые течения дисперсий в диапазоне напряжённостей электрического поля до 3 кВ/мм. Выбран оптимальный наполнитель, на основе которого приготовлена высококонцентрированная электрореологическая жидкость для применения в электростатических крепёжных устройствах. Жидкость показала значения удельного фиксирующего усилия крепления поверхности детали около 60 кПа.

Представлено результати дослідження реологічних властивостей дисперсій на основі синтезованих золь–гель-методом нанорозмірних частинок діоксиду титану, гібридного матеріалу діоксид титану–карбоксиметилцелюлоза і гідратованого оксиду заліза в електричному полі. Визначено криві течії дисперсій у діяпазоні напруженостей електричного поля до 3 кВ/мм. Обрано оптимальний наповнювач, на основі якого виготовлено висококонцентровану електрореологічну рідину для застосування в електростатичних кріпильних пристроях. Рідина показала значення питомого фіксувального зу-

силля кріплення поверхні деталі близько 60 кПа.

Results of investigations of rheological properties of dispersions based on the nanosize particles of titanium dioxide, a hybrid titanium dioxide-carboxymethylcellulose material, and hydrated iron oxide synthesized by sol-gel method in the electrical field are presented. Flow curves of the dispersions in a range of the electric field strength up to 3 kV/mm are determined. The optimal filler is chosen and is a base of the high-concentrated electrorheological fluid prepared for using in electrostatic fixing devices. The fluid demonstrates the values about 60 kPa for specific fixing force of fastening of a part surface.

Ключевые слова: электрореологическая жидкость, золь-гель-синтез, наноразмерный наполнитель, напряжение сдвига, фиксирующее усилие.

(Получено 18 ноября 2010 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современного производства является разработка и изготовление специальной станочной оснастки, в частности, высокопроизводительных зажимных приспособлений, контактирующих с поверхностью детали. Для этой цели возможно применение электростатических крепежных устройств с использованием электрореологических жидкостей (ЭРЖ). Поскольку удерживающая сила распределена равномерно по всей поверхности электродов, небольшие изделия можно закрепить независимо от их положения на поверхности зажимного устройства. Фиксирующая способность устройства основана на эффекте структурирования жидкости в электрическом поле. Прочность структуры ЭРЖ зависит от прочности контактов частиц друг с другом, их количества и напряженности электрического поля. Поэтому важной задачей является создание мелкодисперсных материалов с высокой электрочувствительностью и сохранение текучести полученных ЭРЖ при высокой концентрации частиц, так как прочность крепления деталей к электродам очень резко уменьшается с увеличением толщины слоя ЭРЖ между ними. Во-первых, чем выше напряженность электрического поля (т.е. отношение разности потенциалов к величине зазора), тем прочнее крепление. Во-вторых, устойчивость структуры ЭРЖ уменьшается с увеличением высоты мостиков.

Электрореологическую чувствительность дисперсной фазы ЭРЖ определяют при измерениях напряжения сдвига в электрическом поле малоконцентрированных (10–20 масс.%) дисперсий частиц в диэлектрической жидкости. Появление в последнее время возможности синтезировать частицы дисперсной фазы с заданными физико-химическими характеристиками позволяет целенаправленно, научно обоснованно создавать эффективные ЭРЖ.

В данной работе представлены результаты исследования структурирования в электрическом поле дисперсий на основе синтезированных наноразмерных частиц диоксида титана (TiO_2), гибридного материала диоксид титана/карбоксиметилцеллюлоза ($\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$) и гидратированного оксида железа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Материалы

Синтез порошков выполняли золь-гель-методом [1], который используется для синтеза монодисперсных оксидов металлов путем гидролиза соответствующих алкоксидов общей формулы $\text{Me}(\text{OR})_n$, где R — алкоксидный радикал.

TiO_2 и $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ синтезировали по методике, представленной в работе [2]. При синтезе использовали изопропоксид титана (IV) (98%) фирмы ACROS ORGANICS (плотность образца $0,950 \text{ г/см}^3$), изопропиловый спирт марки «х.ч.» с содержанием воды 0,2 вес.%, диэтиламин (катализатор гидролиза) марки «ч.», карбоксиметилцеллюлозу и дистиллированную воду. Синтез выполняли в герметичной колбе объемом 250 мл, снабженной мешалкой и капельной воронкой. В колбу помещали гидролизующую смесь, которая состояла из изопропилового спирта (48 мл) и воды (1,77 мл). При непрерывном перемешивании в колбу по каплям вводили изопропоксид титана (13,35 мл). Полученную смесь гомогенизировали в течение 30 мин. При введении изопропоксида титана наблюдалось помутнение раствора. Затем небольшими порциями добавляли спиртовой раствор диэтиламина (на 41 мл спирта 1,35 мл диэтиламина). Раствор непрерывно перемешивали в течение 20 ч для завершения гидролиза при температуре 20°C . Полученный золь центрифугировали в течение 10 мин, надосадочную жидкость отделяли и определяли ее pH (значение pH было близко к 10). Осадок сушили в сушильном шкафу при температуре 60°C до постоянного веса. При синтезе композитов диоксид титана/КМЦ в гидролизующую смесь добавляли раствор КМЦ в изопропанол, который готовили путем растирания в ступке КМЦ в небольшом количестве спирта. Количество вводимой КМЦ составляло 0,38 г, 0,46 г и 0,53 г. После добавления в гидролизующую смесь 12,46 мл изопропоксида титана при перемешивании малыми порциями вводили спиртовой раствор диэтиламина (на 19,77 мл спирта 1,53 мл диэтиламина). После перемешивания в течение 20 ч реакционная смесь представляла собой густую массу (значение pH близко к 10), которую сушили при 60°C до постоянного веса.

Образцы гидратированного оксида железа получали методом гетерогенного осаждения путем одновременного сливания при интен-

сивном перемешивании 1,0 М водного раствора FeCl_3 и щелочных реагентов при значениях рН равных 12,0 и 9,0. В качестве щелочных реагентов использовали 1,0 М раствор NaOH и водный 25,5 масс.% раствор NH_3 , температура осаждения — $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Степень перехода свежесозданного осадка ферригеля из аморфного состояния в кристаллическое определяется условиями выполнения стадии старения. После осаждения половину осадка (образцы Fe-1 и Fe-3) вместе с жидкой фазой подвергали старению. Оставшуюся часть осадка (образцы Fe-2 и Fe-4) отмывали водой методом декантации и сушили при температуре 80°C , а затем помещали в маточный раствор для старения. Старение всех осадков выполняли при температуре 80°C в течение 48 ч. После старения осадки промывали на вакуум-фильтре, контролируя рН промывной воды, а затем сушили при температуре 70°C .

По результатам выполненного рентгеноструктурного анализа полученные образцы TiO_2 и гибридного материала $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ аморфные. Рентгенограммы образцов Fe-1 и Fe-2 соответствуют известным данным для фазы $\alpha\text{-FeO(OH)}$ (гетит), а образцов Fe-3 и Fe-4 для фазы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), причем у образца Fe-3 имеется более выраженная кристаллическая структура.

Электронная микроскопия полученных образцов показала, что все порошки имеют полидисперсный состав. Частицы немодифицированного TiO_2 представляют собой слипшиеся чешуйки размером от 300 до 700 нм. В порошках гибридного $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ присутствуют как небольшие агломераты таких слипшихся чешуек, так и гораздо более крупные с гладкой поверхностью. С увеличением количества вводимой КМЦ сращивание исходных частиц TiO_2 усиливается, поверхность агломератов становится более гладкой. Формы и размеры частиц гидратированных оксидов железа зависят от условий их получения. Так, образец Fe-1 содержит аморфные частицы сферической формы размером 1–3 μm и их агломераты, размер которых составляет 10–15 μm , что свидетельствует о способности первичных частиц к агломерации. Частицы образца Fe-2 отличаются изометрической формой кристаллического строения, причем преобладающей является фракция 15–20 μm . Можно отметить, что частицы образца Fe-3 по дисперсному составу близки к образцу Fe-1, но более окристаллизованы, что объясняется различием в фазовом составе образцов.

ИК-спектры всех синтезированных образцов TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ и КМЦ сходны, поскольку и TiO_2 , и КМЦ содержат функциональные гидроксильные группы и адсорбированную воду. Различия проявляются в форме пиков в области $1800\text{--}900\text{ см}^{-1}$. Появление в ИК-спектре продуктов гидролиза ряда пиков при волновых числах менее 1000 см^{-1} связано с вкладом групп CN и CN_2 полимера. Форма спектров закономерно изменяется при переходе от диоксида титана

к гибридным материалам и далее к КМЦ. Чистый диоксид титана характеризуется широкой полосой при волновых числах $3500\text{--}3000\text{ см}^{-1}$, связанной с вкладом ОН-групп, а также широким пиком при $2500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$. При введении КМЦ наблюдается уширение полосы до $3500\text{--}2800\text{ см}^{-1}$, пик при $2150\text{--}1630\text{ см}^{-1}$ становится уже и появляется большое число пиков при волновых числах $1700\text{--}1000\text{ см}^{-1}$. При максимальном содержании КМЦ спектр гибридного материала близок к спектру чистой КМЦ.

ИК-спектры образцов гидратированных оксидов железа характеризуются присутствием полос поглощения, относящимся к валентным и деформационным колебаниям ОН-групп и молекул воды. ИК-спектры образцов Fe-2 и Fe-4 характеризуются наличием более широких пиков с максимумами $1620\text{--}1630\text{ см}^{-1}$, чем спектры образцов Fe-1 и Fe-3, у которых данные пики смещены в области более высоких частот 1655 и 1637 см^{-1} . Сравнение ИК-спектров образцов показывает, что они существенно отличаются как в области валентных, так и деформационных колебаний ОН-групп и молекул H_2O . Так, на ИК-спектре образца Fe-1 в области валентных колебаний ОН-групп наблюдается интенсивная полоса с максимумом 3140 см^{-1} , в деформационной области — полосы при 1655 см^{-1} и слабо выраженные при 1407 и 1420 см^{-1} . В то же время образец, полученный старением осадка, предварительно отмытого и высушенного, характеризуется ИК-спектром со слабо разрешенными полосами в области $1000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ и с наличием полос при 3400 , 3160 , 1630 и 1477 см^{-1} . Такое отличие в спектрах может быть связано с более низкой окристаллизованностью образца Fe-2 по сравнению с Fe-1. Образцы Fe-3 и Fe-4, содержащие кристаллическую фазу гематит, имеют близкие ИК-спектры, которые характеризуются полосами колебаний в области 3400 или 3420 см^{-1} , 1620 или 1637 см^{-1} , 1490 или 1462 см^{-1} . Наличие в ИК-спектрах полос в области деформационных колебаний при 1630 , 1620 , 1637 см^{-1} указывает на присутствие в составе образцов молекул H_2O , которые могут иметь водородные связи с ОН-группами, координированными ионом железа. Такие молекулы H_2O в составе наполнителей ЭРЖ могут играть роль активаторов и обуславливать электрореологический эффект жидкости.

Выполненный термический анализ порошков TiO_2 и гибридного материала $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ показывает два экзотермических пика. Первый пик в интервале температур $91\text{--}109^\circ\text{C}$ относится к удалению адсорбированной воды. Второй пик в интервале $489\text{--}546^\circ\text{C}$ связан с кристаллизацией рентгеноаморфной фазы TiO_2 . Для гибридных материалов $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ уменьшение массы в интервале $200\text{--}500^\circ\text{C}$ связано с выгоранием КМЦ.

Известно, что активатором электрореологического эффекта гидратированных оксидов является неструктурная вода, находящаяся в межслоевом пространстве в виде молекул H_2O , связанных с ОН-

группами водородной связью и образующих мономолекулярный слой на поверхности частиц. Анализ результатов термической дегидратации образцов гидратированного оксида железа показывает, что основная часть воды для всех образцов теряется до температуры 200°C, однако дегидратация наблюдается вплоть до 400°C, т.е. до полного перехода образцов в оксиды железа (III). Образцы Fe-1 и Fe-2 содержат на 5–6% больше воды, чем образцы Fe-3 и Fe-4, что объясняется условиями получения и химическим составом образцов. При термообработке в интервале температур 100–200°C происходит интенсивное удаление неструктурной воды. При этом наибольшее количество удаляется в образцах Fe-1 и Fe-2. Это может свидетельствовать о наличии в составе образцов либо гидратированных соединений, либо межслоевой воды, входящей в структуру гетита. Неструктурная вода, удаляемая в интервале температур 100–200°C, имеет достаточно прочную связь. Характеристики полученных наполнителей представлены в табл.

2.2. Реологические свойства

Для оценки электрореологической чувствительности полученных материалов приготовлены дисперсии с 20 масс.% наполнителя в трансформаторном масле, и определены их кривые течения (зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$) без воздействия электрическим полем и при воздействии электрическим полем различной напряженности при $T = 20^\circ\text{C}$.

Измерения выполнены на ротационном вискозиметре «Rheotest 2.1» с использованием ячейки, модифицированной для подключения высоковольтного электрического поля в диапазоне скоростей сдвига 0,6–280 с⁻¹. ЭР-чувствительность оценивалась по величине относительного напряжения сдвига $\tau_E/\tau_{E=0}$, где τ_E — напряжение сдвига в электрическом поле напряженностью E , $\tau_{E=0}$ — напряжение сдвига без воздействия электрического поля.

На рисунках 1, 2 представлены зависимости относительного напряжения сдвига τ и плотности тока дисперсий, содержащих оксид титана и гибридный материал TiO₂/КМЦ с различным содержанием КМЦ и гидратированные оксиды железа от напряженности электрического поля при $\dot{\gamma} = 17,24$ с⁻¹.

Дисперсии TiO₂ и TiO₂/КМЦ проявляют высокую ЭР-чувствительность, но величина плотности тока образцов немодифицированного TiO₂ и TiO₂/КМЦ с содержанием КМЦ 45,9 масс.% не позволяет увеличивать напряженность электрического поля более 2 кВ/мм. Оптимальное содержание КМЦ в гибридном материале снижает плотность тока, что позволяет увеличить напряженность электрического поля до 3 кВ/мм и достичь увеличения $\tau_{E=3 \text{ кВ/мм}}/\tau_{E=0} \approx 70$.

ТАБЛИЦА. Условия получения и результаты исследования гидратированных оксидов железа.

Номер образца	Стадия осаждения					Стадия старения		Содержание, мас. %		Фаза, идентифицированная рентгенографически	
	Способ осаждения	Соля железа, концентрация	Осадитель, концентрация	pH	Температура, °C	Условия	Температура, °C	Продолжительность, ч	Fe ₂ O ₃		H ₂ O**
Fe-1	Гетерогенный непрерывный	FeCl ₃ 1 моль/л	NaOH 1 моль/л	12,0	20	Свежесозданный осадок в маточном растворе, рН суспензии 12,0	80	48	87,5	12,5	α-FeO(OH) гетит
Fe-2*	Гетерогенный непрерывный	FeCl ₃ 1 моль/л	NaOH 1 моль/л	12,0	20	Осадок после прокалики и сушки, рН суспензии 11,7	80	48	88,0	12,0	α-FeO(OH) гетит
Fe-3	Гетерогенный непрерывный	FeCl ₃ 1 моль/л	NH ₄ OH 25 мас. %	9,5	20	Свежесозданный осадок в маточном растворе, рН суспензии 9,5	80	48	92,8	6,2	α-Fe ₂ O ₃ гематит
Fe-4*	Гетерогенный непрерывный	FeCl ₃ 1 моль/л	NH ₄ OH 25 мас. %	9,5	20	Осадок после прокалики и сушки, рН суспензии 9,3	80	48	80,9	8,1	α-Fe ₂ O ₃ гематит

Примечание: Перед стадией старения маточный раствор отделяли от осадка, осадок промывали, сушили при температуре 80°C, а затем подвергали старению в маточном растворе. **Содержание воды после сушки при 100°C.

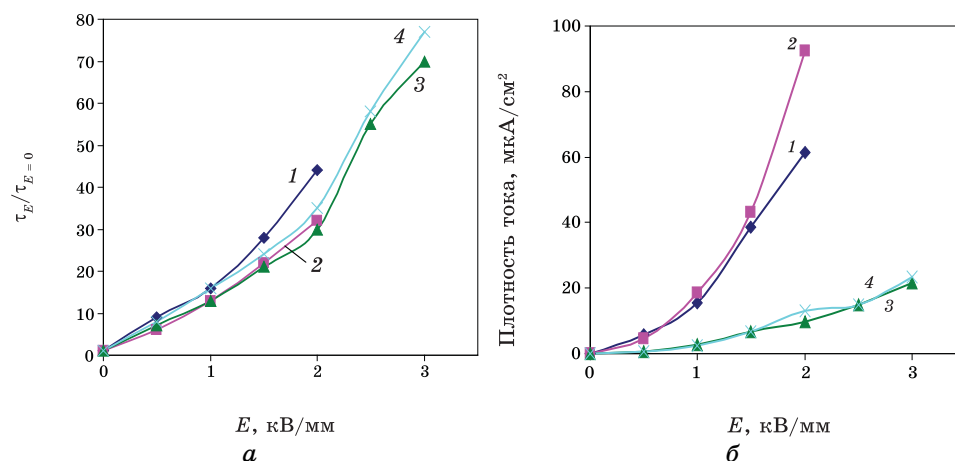


Рис. 1. Зависимость относительного напряжения сдвига (а) и плотности тока (б) ЭР-дисперсий, содержащих оксид титана и гибридный материал TiO_2/KMPC с различным содержанием KMPC от напряженности электрического поля при $\dot{\gamma} = 17,24 \text{ c}^{-1}$: 1 — TiO_2 , 2 — TiO_2/KMPC с 45,9 масс.% KMPC, 3 — TiO_2/KMPC с 14,8 масс.% KMPC, 4 — TiO_2/KMPC с 37,5 масс.% KMPC.

Среди гидратированных оксидов железа образец Fe-4 проявляет наивысшую ЭР-чувствительность ($\tau_{E=3 \text{ кВ/мм}}/\tau_{E=0} \approx 50$), при этом величина плотности тока оптимальная, достаточная для проявления ЭР-эффекта и в то же время позволяет использовать напряженность электрического поля до $E = 4 \text{ кВ/мм}$.

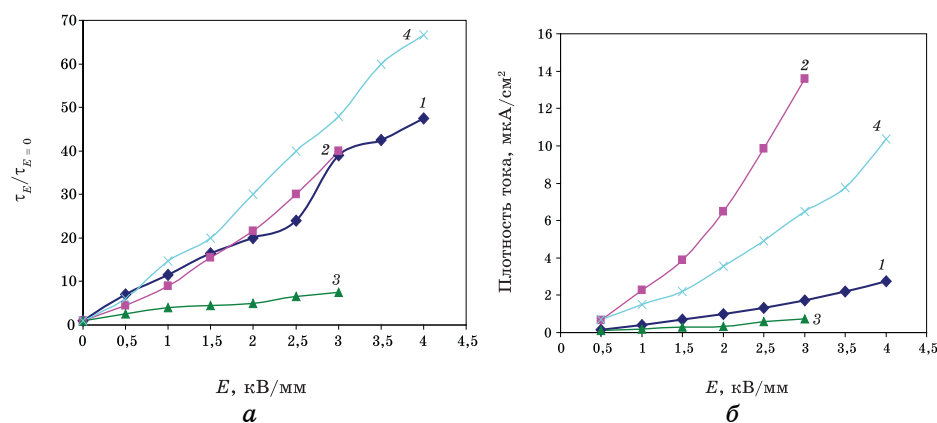


Рис. 2. Зависимость относительного напряжения сдвига (а) и плотности тока (б) ЭР-дисперсий на основе гидратированных оксидов железа от напряженности электрического поля при $\dot{\gamma} = 17,24 \text{ c}^{-1}$: 1 — Fe-1, 2 — Fe-2, 3 — Fe-3, 4 — Fe-4.

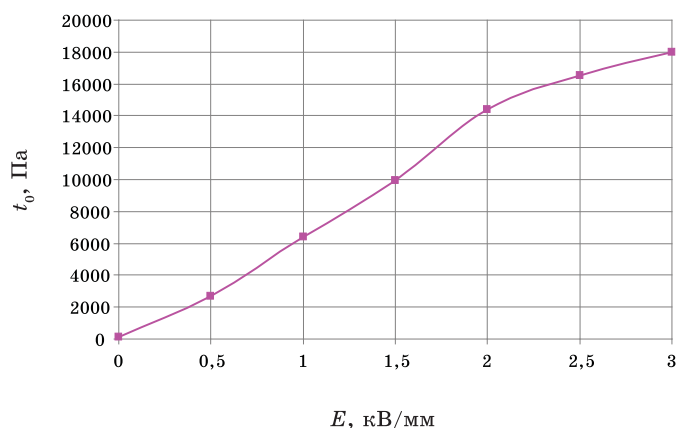


Рис. 3. Зависимость статического предела текучести τ_0 ЭРЖ, содержащей 60 масс.% гидратированного оксида железа Fe-4, от напряженности электрического поля.

Учитывая трудоемкость процесса синтеза гибридного материала $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ и высокую стоимость исходных титаносодержащих реагентов, при использовании в качестве дисперсной фазы фиксирующих ЭРЖ предпочтение отдано образцу гидратированного оксида железа Fe-4. С этой целью приготовлена высококонцентрированная ЭРЖ, содержащая 60 масс.% гидратированного оксида железа Fe^{-4} в трансформаторном масле с добавлением поверхностно-активных веществ. Статический предел текучести τ_0 полученной ЭРЖ определен на приборе Physica MCR 301 фирмы Anton Paar (рис. 3). τ_0 является характеристикой жидкости, определяющей ее фиксирующую способность. ЭРЖ дает увеличение статического предела текучести почти в 200 раз в электрическом поле $E = 3$ кВ/мм.

Далее эта жидкость испытана на предмет использования в качестве рабочей жидкости электростатических крепежных устройств. Крепление детали к электроду через слой ЭРЖ в крепежных устройствах может осуществляться по двум схемам, которые показаны на рис. 4. В случае проводящих деталей схема содержит электрод 1, закрепленный в непроводящем основании 2, на который подается высоковольтный потенциал (ВП) источника напряжения, слой ЭРЖ 3 и деталь 4, соединенную с другим полюсом источника напряжения (схема I). Для крепления деталей из диэлектрического материала используется схема II. Площадь крепления состоит из чередующихся электродов 1, соединенных с разными полюсами источника напряжения и закрепленных в непроводящем основании 2. Эта схема может быть применена для крепления металлических деталей, если их поверхность или поверхность электродов защищается специальным покрытием. Деталь 4 размещается на слое ЭРЖ 3, разность потенциалов создается

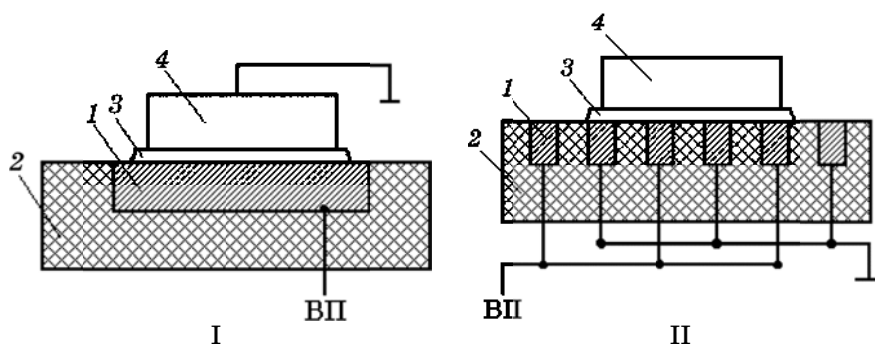


Рис. 4. Схемы крепления детали к электроду через слой ЭРЖ.

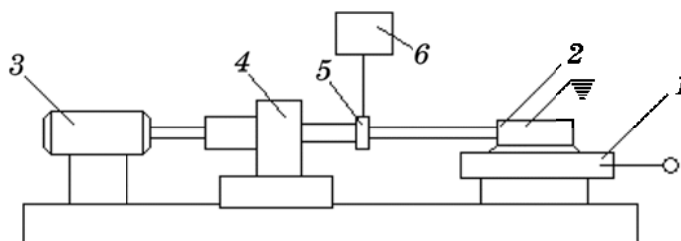


Рис. 5. Схема установки для определения фиксирующего усилия.

между соседними электродами. В случае крепления по схеме I токопроводящая цепь идет по мостикам из частиц от электрода к детали, а по схеме II — от одного электрода по мостикам из частиц, затем по поверхности детали и снова по мостикам к другому электроду. Для получения достаточно прочного сцепления детали с электродами необходимо обратить внимание и на механические свойства структуры ЭРЖ в электрическом поле, и на условия взаимодействия частиц ЭРЖ с поверхностями электродов и детали.

Прочность крепления детали к электродам проверяется путем приложения сдвигающей силы к детали. На рисунке 5 приведена схема установки для определения величины фиксирующего усилия. На поверхность электродов 1 наносится тонкий сплошной слой ЭРЖ, и по этому слою деталь 2 плотно притирается к электродам. При креплении проводящих материалов по схеме I деталь заземляется. Привод 3 (рис. 5) передает поступательное движение (скорость 0,04 мм/с) каретке 4. Величина фиксирующего усилия измеряется датчиком 5 и фиксируется самописцем 6. Определяется усилие, при котором деталь сдвигается с электрода, его значение делится на площадь детали и рассчитывается удельное фиксирующее усилие (в кПа). Крепление диэлектрических материалов осуществляется по схеме II.

На рисунке 6 представлена зависимость фиксирующего усилия на единицу площади (1 см^2) алюминиевой детали от приложенного электрического напряжения (схема I, рис. 4). Толщина диэлектрического слоя оксида алюминия 35 мкм оказывается недостаточной, так как при подаче напряжения выше 1500 В происходит пробой, но до 1500 В фиксирующие усилия достигают максимума. При толщине диэлектрического слоя 75 мкм велико его электрическое сопротивление и фиксирующее усилие значительно снижается.

Зависимость величины фиксирующего усилия на единицу площади диэлектрической детали из асбоцемента без покрытия и с ла-

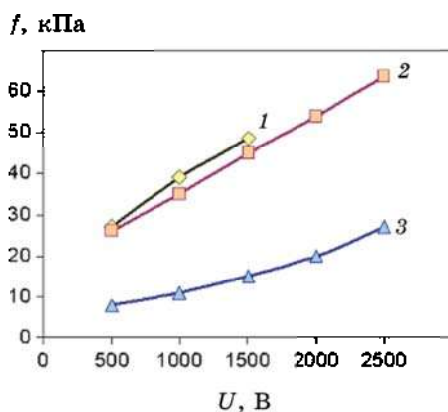


Рис. 6. Зависимость удельного фиксирующего усилия при креплении алюминиевой детали от напряжения электрического поля: 1 — толщина диэлектрического покрытия электрода 35 мкм , 2 — 50 мкм , 3 — 75 мкм .

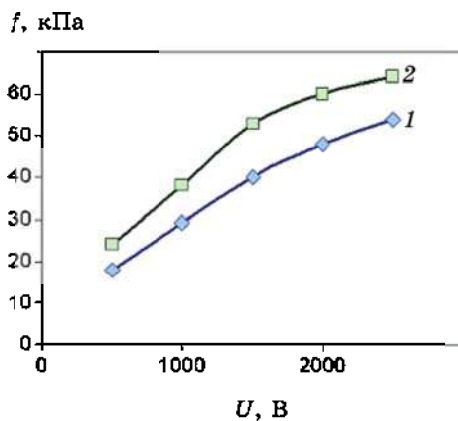


Рис. 7. Зависимость удельного фиксирующего усилия при креплении детали из асбоцемента от напряжения электрического поля: 1 — без покрытия, 2 — с лаковым покрытием.

ковым покрытием от величины приложенного электрического напряжения (схема II, рис. 4, ширина электрода 2 мм, ширина диэлектрического зазора 2 мм) приведена на рис. 7.

Испытания показали, что очень важно обеспечить параллельность поверхностей детали и электродов, ровный (без разрывов) слой ЭРЖ должен быть не толще 50 мкм.

На рисунке 8 изображена графическая запись изменения фиксирующего усилия во времени, характерная для крепления детали из асбоцемента с лаковым покрытием (схема II, рис. 4). Для зависимости фиксирующего усилия от времени воздействия сдвигающей силы на деталь характерны три участка: I — жесткое крепление; II — течение жидкости; III — срыв детали. Рост напряжения электрического поля приводит к увеличению фиксирующего усилия, при высоких напряжениях ($U > 2500$ В) возможно снижение усилия — происходит «хрупкий скол» ЭРЖ с детали или электрода. Выбор оптимального состава ЭРЖ, способа обработки электродов и поверхности детали, отработка методики крепления позволяют получить значения удельного фиксирующего усилия крепления поверхности

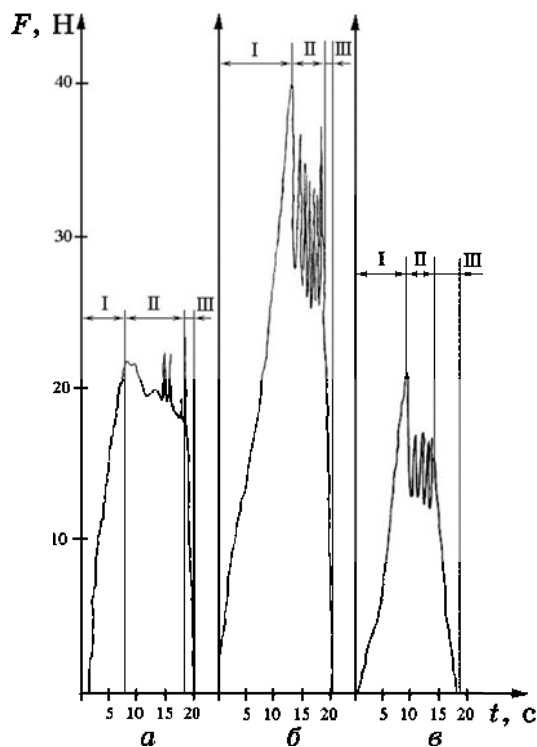


Рис. 8. Графическая запись изменения фиксирующего усилия во времени: а — $U = 1500$ В, б — 2500 В, в — 3000 В.

детали около 60 кПа, что значительно выше результатов, представленных в работе [3].

3. ВЫВОДЫ

Таким образом, реологические исследования дисперсий на основе синтезированных наноразмерных частиц диоксида титана TiO_2 , гибридного материала диоксид титана/карбоксиметилцеллюлоза $\text{TiO}_2/\text{КМЦ}$ и гидратированного оксида железа показали, что среди титаносодержащих жидкостей наилучший электрореологический эффект показывают ЭРЖ с оптимальной концентрацией КМЦ. Среди жидкостей с дисперсной фазой на основе гидратированного оксида железа большее увеличение напряжений сдвига проявляет образец, содержащий кристаллическую гематитную фазу. Высококонцентрированная ЭРЖ на основе данного образца показала значения удельного фиксирующего усилия крепления поверхности детали около 60 кПа, что позволяет использовать ее в качестве рабочей жидкости электростатических крепежных устройств.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Чалый, *Гидроокиси металлов* (Киев: Наукова думка: 1972).
2. А. С. Краев, А. В. Агафонов, О. И. Давыдова, Т. А. Нефедова, Т. А. Трусова, А. Г. Захаров, *Коллоидный журнал*, **69**, № 5: 661 (2007).
3. Н. Tanaka, Y. Kakinuma, T. Aoyama, and H. Anzai, *Journal of Physics: Conference Series*, **149**: 012029 (2009).