

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИЙ НАНОПОРОШКА НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОЛОКИ

© 2022 г. Е. Г. Калинина^{a,b,*}

^aИнститут электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

^bУральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: jelen456@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2022 г.

После доработки 11.03.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2022 г.

Представлены результаты исследования электрокинетических свойств неводных суспензий с различной концентрацией слабоагрегированных наночастиц на основе оксида алюминия с металлическим компонентом, полученных методом электрического взрыва проволоки (ЭВП) из сплава Al–Mg. Впервые установлена зависимость дзета-потенциала от концентрации суспензии на основе наночастиц оксида алюминия, обусловленная коллективным эффектом перекрывания сольватных оболочек наночастиц. Установлено возникновение пузырьков в электрофоретических осадках из неводных суспензий на основе наночастиц оксида алюминия с металлическим компонентом. Исследовано влияние обработки суспензии и предложены возможные механизмы электрофоретического осаждения (ЭФО) для объяснения обнаруженных особенностей морфологии осажденных слоев.

Ключевые слова: Al₂O₃, нанопорошок, неводная суспензия, дзета-потенциал, электрофоретическое осаждение

DOI: 10.31857/S0044453722090163

Керамические покрытия на основе оксида алюминия характеризуются температурной и химической стойкостью, достаточно высокой прочностью, что обуславливает их применение в различных отраслях промышленности и материаловедения [1]. Актуально применение композитных материалов с применением оксида алюминия благодаря улучшению механических характеристик и эффектам увеличения ионной проводимости в электрохимических устройствах [2, 3]. Перспективный коллоидный метод формирования покрытий – метод электрофоретического осаждения (ЭФО), который обладает низкой стоимостью технологической реализации, позволяет проводить осаждение на поверхности сложной формы, а также осуществлять регулирование толщины покрытий путем изменения времени и приложенного напряжения [4–7].

Процесс ЭФО сопряжен как с движением частиц в суспензии, так и с образованием осадка на электроде. Исходной причиной электрофоретического движения частиц в суспензии под действием внешнего электрического поля служит возникновение на их поверхности избыточного электрического заряда, например, за счет специ-

фически адсорбированных ионов (потенциал-определяющие ионы), тем самым, в жидкой среде вокруг частиц происходит увеличение концентрации ионов противоположного знака (противоионы) и образование двойного электрического слоя (ДЭС) [8, 9]. Согласно модели Гуи–Чепмена–Штерна, структура ДЭС включает в себя плотную и диффузную части, характерная толщина ДЭС – длина Дебая – связана с концентрацией ионов в жидкой среде. Пространственное разделение заряда характеризуется важнейшим параметром дисперсной системы – дзета-потенциалом, величина которого определяет стабильность коллоидной системы, согласно теории Дерягина, Ландау, Фервейя, Овербека [10, 11], а также электрофоретическую подвижность частиц в суспензии [12], которая связана с диэлектрической проницаемостью и динамической вязкостью жидкой среды, а также зависит от соотношения между размером частицы и длиной Дебая.

Известно, что концентрация протонов (значение pH) в водных и неводных средах оказывает непосредственное влияние на значение дзета-потенциала [13] ввиду специфической адсорбции протонов на поверхности диспергированных ча-

стиц. Вместе с тем, представляет интерес изучение влияния концентрации частиц в суспензии на дзета-потенциал, что недостаточно отражено в литературе. Наночастицы в жидкой среде характеризуются сложным характером взаимодействия за счет более высокой поверхностной энергии и склонности к образованию агрегатов [14], что особенно усложняется в концентрированных суспензиях, и может приводить к их нестабильности. Сложный характер межчастичных взаимодействий в наносуспензиях подчеркивается авторами [15] в условиях, когда радиус частиц существенно меньше радиуса действия поверхностных сил, возникающих при взаимодействии между наночастицами в концентрированной суспензии при взаимном перекрывании областей взаимодействия. Эффект снижения дзета-потенциала при повышении концентрации наночастиц Fe_2O_3 в суспензии был показан в работе [16].

Суспензии на основе слабоагрегированных нанопорошков со сферической формой частиц, полученных методом электрического взрыва проволоки (ЭВП) представляют интерес благодаря эффекту самопроизвольного формирования высоких значений дзета-потенциала и их самостабилизации [17], что позволяет проводить процесс ЭФО без применения дисперсантов и зарядовых агентов в суспензиях невысокой концентрации (10 г/л) [18]. Концентрация и размер частиц в суспензиях могут оказывать существенное влияние на плотность получаемых неспеченных осадков и, тем самым, на плотность полученных покрытий и объемной керамики при использовании метода ЭФО [19]. В связи с этим, представляет интерес рассмотрение свойств концентрированных суспензий наночастиц, полученных методом ЭВП, с учетом индивидуальных свойств применяемых порошков и их предистории. Особенностью ЭВП-нанопорошка на основе оксида алюминия, полученного из сплава Al–Mg [20], является наличие в его составе металлического алюминия, что, возможно, оказывает влияние на морфологию ЭФО-осадков. Необходимо установление фундаментальных взаимосвязей между электрокинетическими параметрами суспензий и их концентрацией, а также с морфологическими особенностями электрофоретически осажденных осадков.

В настоящей работе исследованы электрокинетические свойства суспензий слабоагрегированных наночастиц на основе оксида алюминия с металлическим компонентом, полученных методом ЭВП из сплава Al–Mg, в контексте применения электрофоретического осаждения при формировании ЭФО-осадков. Задачи настоящей работы – исследование влияния концентрации суспензий наночастиц на дзета-потенциал и значение рН, установление взаимосвязи морфоло-

гии ЭФО-осадков с особенностями применяемого ЭВП-нанопорошка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Нанопорошок на основе оксида алюминия получали методом электрического взрыва проволоки (ЭВП), изготовленной из сплава Al–Mg с содержанием Mg 1.3 мас. %. [20–22]. По данным просвечивающей электронной микроскопии, частицы нанопорошка имели сферическую форму (рис. 1а). Распределение частиц по размерам определяли посредством графического анализа микрофотографий наночастиц. Распределение имело логнормальный вид (рис. 1б) и характеризовалось функцией следующего вида:

$$f(D) = \frac{1}{D\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln D - \ln \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где D – диаметр частиц, нм; μ – среднее значение диаметра, нм; σ^2 – дисперсия логнормального распределения. Значения параметров функции распределения: $\mu = 19.0$ нм, $\sigma = 0.632$.

Среднечисловой диаметр наночастиц составил 22 нм, удельная поверхность, которую определяли методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), составила $S_{\text{БЭТ}} = 40$ м²/г. Для сферических частиц значение удельной поверхности позволяет рассчитать средний диаметр частиц ($d_{\text{БЭТ}}$) по формуле [23]:

$$d_{\text{БЭТ}} = \frac{6}{\rho S_{\text{БЭТ}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{БЭТ}}$ – удельная поверхность нанопорошка, м²/г; ρ – теоретическая плотность материала (для γ -фазы оксида алюминия $\rho = 3.68$ г/см³). Средний диаметр частиц нанопорошка, вычисленный по формуле (2), составил 41 нм. Данные РФА для нанопорошка представлены в табл. 1. По данным РФА, магний в исходном нанопорошке не образовал отдельную кристаллическую фазу. Можно предположить, что при формировании частиц методом ЭВП магний присутствует в виде ионов внедрения или замещения в кристаллической решетке Al_2O_3 .

Нанопорошок на основе оксида алюминия использовали для приготовления суспензий в среде изопропилового спирта. Суспензии готовили без введения дисперсантов или других добавок. Исходные суспензии с концентрацией 25, 50, 100, 150 и 250 г/л готовили по точной навеске нанопорошка и обрабатывали ультразвуком с помощью ультразвуковой ванны УЗВ-13/150-ТН (“Рэлтек”, Россия) в течение 5–125 мин. В суспензиях с различной концентрацией проводили измерение дзета-потенциала и рН. Отдельно проводили серию экспериментов по электрофоретическому осаждению из суспензий фиксированной кон-

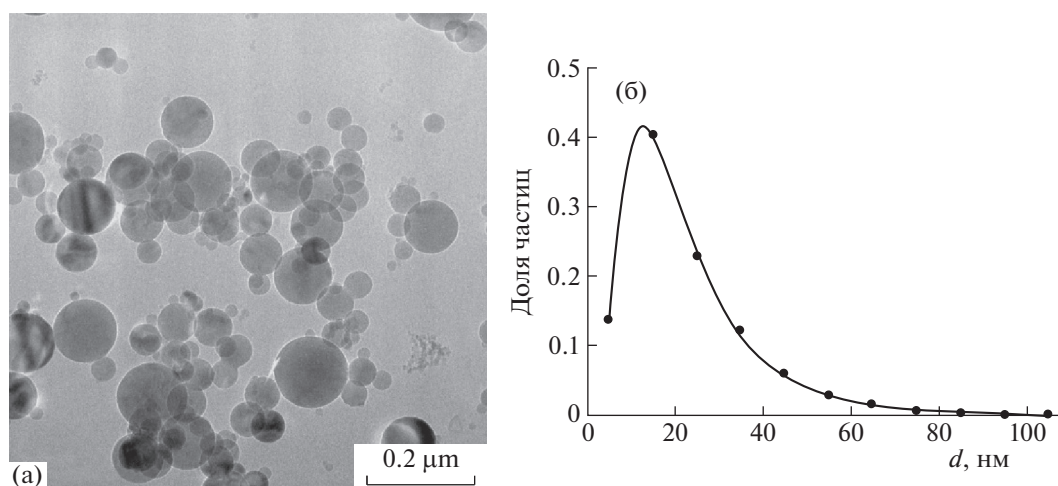


Рис. 1. Морфология наночастиц на основе оксида алюминия (а) и числовое распределение частиц по размерам по данным ПЭМ-изображения (б).

центрации 100 г/л. Удаление неразрушенных крупных агрегатов при ультразвуковой обработке в суспензии проводили методом центрифугирования с помощью центрифуги Z383 (Hermle Labortechnik, Германия) со скоростью 6000 об/мин в течение 3 мин. Измерение электрокинетического дзета-потенциала и pH в суспензиях проводили электроакустическим методом с помощью анализатора DT-300 (Dispersion Technology, США). Все измерения для суспензий проводили в изотермических условиях на воздухе при 25°C.

Электрофоретическое осаждение выполняли на специализированной компьютеризированной установке, обеспечивающей режимы постоянства напряжения, которая была разработана и изготовлена в ИЭФ УрО РАН. ЭФО выполняли при вертикальном расположении электродов. Осаждение проводили в ячейке с электродами из никелевой фольги, расстояние между ними составляло 10 мм. При ЭФО-покрытий напряжение со-

ставляло от 5 до 40 В, варьировали при этом время осаждения от 20 с до 1 мин. Полученные покрытия сушили на электроде в течение суток при комнатной температуре в чашке Петри.

Морфологию наночастиц оксида алюминия исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM 2100 (JEOL, Токио, Япония). Морфологию тонкопленочных покрытий, полученных методом ЭФО, исследовали с помощью оптического микроскопа ST-VS-520 (Россия). Рентгенофазовый анализ нанопорошка проводили на дифрактометре D8 DISCOVER (Bruker AXS, Германия). Обработку выполняли с использованием программы TOPAS-3. Удельную поверхность нанопорошка определяли объемным вариантом метода БЭТ по низкотемпературной равновесной сорбции паров азота из смеси с гелием на вакуумной сорбционной установке TriStar 3000 (Micromeritics, Германия).

Таблица 1. Данные РФА нанопорошка на основе оксида алюминия

Кристаллическая фаза	Содержание кристаллической фазы, мас. %	Тип решетки, пространственная группа	Параметры решетки, Å	ОКР, нм
γ -Al ₂ O ₃	≈31	кубическая, $Fd\bar{3}m$	$a = 7.950 (\pm 0.010)$	26 (±2)
Металлический Al	≈0.3	кубическая, $Fm\bar{3}m$	$a = 4.054 (\pm 0.004)$	≈150
α -Al ₂ O ₃	≈0.4	ромбоэдрическая, $R\bar{3}c$	$a = 4.764 (\pm 0.004)$ $c = 12.99 (\pm 0.02)$	≈180
δ -Al ₂ O ₃	≈69	орторомбическая, $P222$	$a = 7.934$ $b = 7.956$ $c = 11.711$	18 (±2)

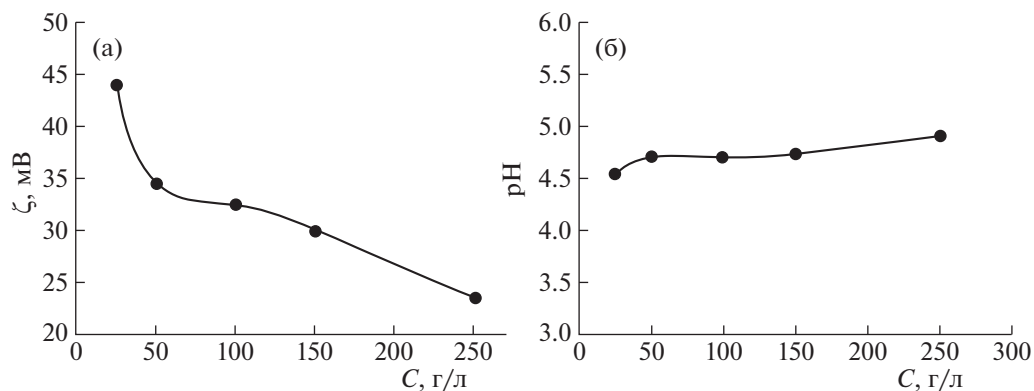


Рис. 2. Зависимости для суспензии нанопорошка на основе Al_2O_3 ; влияние концентрации суспензии на дзета-потенциал (а) и на значение рН (б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние концентрации суспензии нанопорошка на основе оксида алюминия на значение дзета-потенциала и рН

Результаты измерений дзета-потенциала и рН суспензий после УЗО в течение 5 мин при различных концентрациях (25, 50, 100, 150, 250 г/л) приведены на рис. 2. Из рис. 2а видно, что ζ -потенциал имеет тенденцию к уменьшению при увеличении концентрации. Обнаруженная тенденция, вероятно, связана с увеличением межчастичного взаимодействия и снижением подвижности частиц при повышении концентрации их в суспензии, что сопровождается сжатием ДЭС и увеличением экранирования избыточного электрического заряда на частицах вследствие перекрывания ДЭС на близкорасположенных частицах в объеме суспензии [24]. Экспериментально обнаруженный эффект уменьшения дзета-потенциала с увеличением концентрации нанопорошка в суспензии подтверждает значимость многочастичного взаимодействия наночастиц в жидкой среде в условиях, когда среднее расстояние между частицами значительно меньше толщины ДЭС. Значение рН несущественно изменяется при изменении концентрации и составляет ~ 4.7 (рис. 2б), что указывает на постоянство ионного состава в суспензии при изменении ее концентрации. Тем самым, выявленное изменение дзета-потенциала можно полностью связать с влиянием концентрации частиц в суспензии. Значению рН 4.7 соответствует концентрация протонов, равная 2×10^{-5} моль/л. Можно оценить соответствующее значение длины Дебая λ_D по уравнению [25]:

$$K = \frac{1}{\lambda_D} = \left(\frac{e^2 \sum n_i z_i^2}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $K = \frac{1}{\lambda_D}$ – обратная длина Дебая, м^{-1} ; e_0 – заряд электрона, Кл; n_i – концентрация ионов с валентностью z_i , м^{-3} ; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость жидкой среды (для изопропилового спирта $\epsilon = 18.3$); ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м; k_B – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

Предполагая, что жидкая среда представляет собой 1–1 зарядный (симметричный) электролит, для рН 4.7 получаем значение $\lambda_D = 33$ нм. Для концентраций суспензии 25, 50, 100, 150, 250 г/л среднее расстояние между частицами, в предположении их равномерного распределения в объеме суспензии, составляет 93, 74, 58, 51, 43 нм, соответственно. Можно сделать вывод, что при рассматриваемых концентрациях суспензий среднее расстояние между наночастицами соизмеримо с длиной Дебая λ_D , т.е. с характеристической толщиной диффузной части ДЭС. Протяженный характер ДЭС и возникающее перекрывание диффузных частей сольватных оболочек наночастиц, таким образом, могут оказывать влияние на изменение дзета-потенциала суспензии. Многочастичное взаимодействие наночастиц, вероятно, возникающее в рассматриваемых условиях, отличается от принятых классических предположений при расчете электрофоретической подвижности [26]. Величина дзета-потенциала в суспензиях с концентрацией, не превышающей 150 г/л, составляла более +26 мВ, данное значение дзета-потенциала выделяют в качестве критерия стабильности коллоидной суспензии [25, 27]. Как видно из рис. 2, для суспензий с концентрацией 25–150 г/л были получены высокие значения дзета-потенциала (+44...+30 мВ), что благоприятно для последующего проведения ЭФО. Самопроизвольное возникновение высокого значения дзета-потенциала может быть связано с образованием катионов алюминия в дисперсионной среде в

Таблица 2. Характеристики суспензий ЭВП-нанопорошка на основе оксида алюминия после ультразвуковой обработки в течение 125 мин, режимы ЭФО и параметры ЭФО-осадков (время осаждения 1 мин)

Тип суспензии (концентрация)	Дзета-потенциал, мВ (рН)	Режим ЭФО (напряжение, В)	Толщина и характер ЭФО-осадка
Исходная (100 г/л)	+42 (5.7)	20	20 мкм; значительное количество пузырьков
Разбавленная из исходной (10 г/л)	+88 (6.4)	35	6 мкм; множественные пузырьки
Центрифугированная (77 г/л)	+50 (4.8)	10	8 мкм; множественные пузырьки
Разбавленная из центрифугированной (10 г/л)	+80 (6.1)	40	4 мкм; единичные пузырьки

результате гидролиза следовых количеств нитратов, неизбежно возникающих на поверхности наночастиц порошка оксида алюминия при получении нанопорошка методом ЭВП [17]. Полученные результаты по изучению зависимости дзета-потенциала от концентрации показали возникновение ограничения на увеличение концентрации суспензии ввиду возникающего снижения дзета-потенциала ниже +26 мВ.

Влияние УЗО, центрифугирования и разбавления суспензии концентрацией 100 г/л на дзета-потенциал, рН и характер ЭФО-осадков

Для дальнейшего изучения влияния ультразвуковой обработки, центрифугирования и разбавления на электрокинетические параметры и морфологию ЭФО-покрытий была выбрана суспензия с концентрацией 100 г/л. Обобщение результатов по влиянию подготовки суспензий на толщину и морфологию ЭФО-осадков представлено в табл. 2. Суспензию нанопорошка на основе Al_2O_3 с концентрацией 100 г/л подвергали УЗО в течение 5, 25, 75, 125 мин и после каждой обработки измеряли дзета-потенциал и рН. После УЗО в течение 5 мин суспензия характеризовалась значениями дзета-потенциала (рН), равными +32 мВ (5.6), после 25 мин значения составили +42 мВ (5.7), при дальнейшем увеличении времени УЗО значения дзета-потенциала и рН не изменялись. Полученная суспензия после УЗО в течение 125 мин была использована для проведения ЭФО на модельный электрод (Ni-фольга) в режимах постоянного напряжения от 5 до 20 В и времени осаждения от 20 с до 1 мин. При проведении ЭФО из суспензии 100 г/л нами было обнаружено возникновение пузырьков в полученных ЭФО-осадках, что может быть связано с особенностями применяемого нанопорошка, в котором присутствует небольшая доля 0.3 мас. % (по данным РФА, табл. 1) металлического алюминия. Частицы алюминия, присутствующие в составе ЭВП-нанопорошка, возможно, покрыты тонким слоем оксидной оболочки, но, несмотря на ее наличие, металлический алюминий может активно реаги-

ровать со следовым количеством воды в составе жидкой среды суспензии.

С целью определения возможного влияния концентрации суспензии на характер покрытий было проведено разбавление суспензии 100 г/л до концентрации 10 г/л с последующим проведением ЭФО на Ni-фольгу (табл. 2). Показано, что разбавление суспензий приводит к снижению количества пузырьков в ЭФО-осадках. Снижение количества образовавшихся пузырьков в осажденных слоях также происходило при проведении центрифугирования суспензий. Ввиду выше установленных тенденций по снижению количества пузырьков при уменьшении концентрации суспензии нами было выполнено разбавление центрифугированной суспензии (77 г/л) до концентрации 10 г/л. Минимальное напряжение ЭФО, при котором происходило образование сплошного слоя толщиной 4 мкм, составило 40 В при времени осаждения 1 мин. Покрытие содержало единичные пузырьки, но их количество было минимальным в проведенной серии экспериментов (табл. 2).

Возможные механизмы ЭФО и их связь с образованием пузырьков в осажденных слоях из суспензий ЭВП-нанопорошка на основе оксида алюминия

На рис. 3 представлена оптическая микрофотография ЭФО-осадка, полученного из суспензии с концентрацией 100 г/л. Образование пузырьков в ЭФО-осадке (рис. 3) в неводной суспензии изопропилового спирта может быть связано с электрохимическими реакциями на электродах [28, 29], а именно, на катоде возможно протекание процесса восстановления протонов H^+ с образованием молекулярного водорода H_2 , либо реакция с образованием молекулярного водорода и гидроксид-ионов при восстановлении следовых количеств воды; на аноде возможно протекание реакции разложения следовых количеств воды с образованием протонов H^+ и молекулярного кислорода O_2 , либо возможно протека-

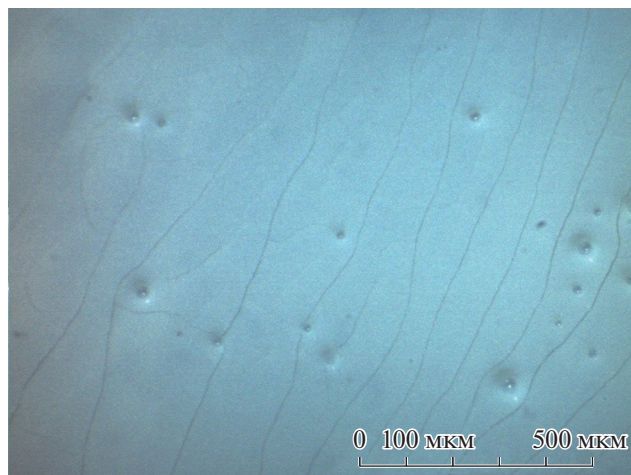
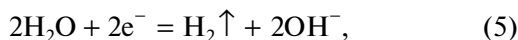


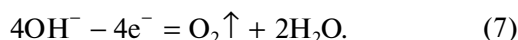
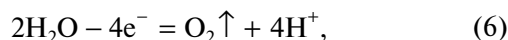
Рис. 3. Оптическая микрофотография ЭФО-осадка, полученного из исходной суспензии с концентрацией 100 г/л.

ние реакции окисления гидроксид-ионов с образованием воды и молекулярного кислорода O_2 :

катод



анод



Вода в суспензию может вноситься при диспергировании порошка, а также при протекании реакции (7). Суспензия с более высокой концентрацией частиц (100 г/л) будет способствовать и более высокой концентрации протонов, участвующих в реакции (4), поскольку процесс образования ЭФО-осадков определяется электрохимической коагуляцией [6, 30]. Отмеченный механизм может лежать в основе выявленной закономерности по увеличению количества пузырьков с повышением концентрации суспензии. Возможно, что основной вклад в образование макроскопических пузырьков и предполагаемое насыщение ЭФО-осадков водородом оказывает наличие в составе исходного ЭВП-нанопорошка 0.3 мас. % металлического алюминия, который при взаимодействии со следовым количеством воды, содержащейся в изопропиловом спирте, образует газообразный водород и гидроксид алюминия. Нами было показано, что применение центрифугирования суспензии позволяет значительно снизить образование пузырьков в покрытиях за счет удаления частиц металлического алюминия при центрифугировании. Необходимо отметить, что появление макроскопических пузырьков в ЭФО-осадках со-

вершенно нехарактерно при осаждении керамических порошковых материалов из неводных суспензий [6, 31]. Выявленные закономерности по применению ЭВП нанопорошка на основе оксида алюминия могут быть учтены при использовании в технологии ЭФО керамического порошкового материала, содержащего частицы металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование электрокинетических свойств неводных суспензий ЭВП-нанопорошка на основе оксида алюминия с металлическим компонентом при изменении их концентрации в диапазоне 25–250 г/л. Установлена зависимость дзета-потенциала суспензии наночастиц на основе оксида алюминия от ее концентрации, а именно, при увеличении концентрации дзета-потенциал уменьшается, что демонстрирует существенную роль межчастичного взаимодействия в концентрированной суспензии, когда происходит перекрывание диффузной части сольватных оболочек наночастиц. Обнаружено появление пузырьков в полученных ЭФО-осадках из суспензий слабоагрегированных наночастиц на основе оксида алюминия в среде изопропилового спирта. Предложен возможный механизм для объяснения обнаруженных особенностей появления макроскопических пузырьков в составе ЭФО-осадков. Показано, что образование пузырьков в ЭФО-покрытиях из неводной суспензии изопропилового спирта может быть связано с электрохимическими реакциями на электродах и присутствием частиц металлического алюминия в составе применяемого ЭВП-нанопорошка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-00066, <https://rscf.ru/project/22-23-00066/>. Измерения дзета-потенциала в суспензиях нанопорошка частично выполнены на оборудовании кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений УрФУ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rakshit R., Das A.* // *Precis. Eng.* 2019. V. 59. P. 90. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.05.009>
2. *Zhang T., Zeng Z., Huang H. et al.* // *Mat. Lett.* 2002. V. 57. № 1. P. 124. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(02\)00717-6](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(02)00717-6)
3. *Sal'nikov V.V., Pikalova E.Yu., Proshina A.V. et al.* // *Russ. J. Electrochem.* 2011. V. 47. № 9. P. 1049. <https://doi.org/10.1134/S102319351108012X>

4. *Hu S., Li W., Finklea H. et al.* // *Adv. Colloid. Interface Sci.* 2020. V. 276. P. 102102.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102102>
5. *Pikalova E., Kalinina E.* // *J. Energy Prod. and Mgm.* 2019. V. 4. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.2495/EQ-V4-N1-1-27>
6. *Pikalova E.Yu., Kalinina E.G.* // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2019. V. 116. P. 109440.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109440>
7. *Kalinina E.G., Pikalova E.Yu.* // *Russ. Chem. Rev.* 2019. V. 88. № 12. P. 1179.
<https://doi.org/10.1070/RCR4889>
8. *Dukhin S.S., Derjaguin B.V.* *Surface and Colloid Sciences. V. 7 (Ed. E. Matijevich).* New York: Wiley-Interscience, 1974. 335 p.
9. *Van der Biest O.O., Vandeperre L.J.* // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1999. V. 29. P. 327.
<https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.29.1.327>
10. *Deryaguin B.V., Landau L.D.* // *Acta Physicochim. URSS.* 1941. V. 14. P. 633.
11. *Verwey E.J.W., Overbeek J.Th.G.* *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids.* Amsterdam: Elsevier, 1948. 205 p.
12. *Henry D.C.* // *Proc. R. Soc. Lond.* 1931. V. A133. P. 106.
13. *Hunter R.J.* *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications. Colloid science. V. 2, 3rd ed.* (Eds R.H. Ottewill, R.L. Rowell). L.: Acad. Press, 1981. 391 p.
14. *Das D., Bagchi B., Basu R.N.* // *J. Alloys Compd.* 2017. V. 693. P. 1220–1230.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.088>
15. *Kovalchuk N.M., Johnson D., Sobolev V. et al.* // *Adv. Colloid. Interface Sci.* 2019. V. 272. P. 102020.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102020>
16. *Lucas I.T., Durand-Vidal S., Bernard O. et al.* // *Mol. Phys.* 2014. V. 112. № 9–10. P. 1463.
<https://doi.org/10.1080/00268976.2014.906672>
17. *Safronov A.P., Kalinina E.G., Smirnova T.A. et al.* // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2010. V. 84. P. 2122.
<https://doi.org/10.1134/S0036024410120204>
18. *Kalinina E.G., Efimov A.A., Safronov A.P.* // *Inorg. Mater.* 2016. V. 52. № 12. P. 1301.
<https://doi.org/10.1134/s0020168516110054>
19. *König K., Novak S., Boccaccini A.R., Kobe S.* // *J. Mater. Process. Technol.* 2010. V. 210. № 1. P. 96.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.007>
20. *Kotov Yu.A., Beketov I.V., Azarkevich E.I. et al.* // *Proceedings of the Ninth CIMTEC-World Ceramic Congress “Ceramics: Getting into the 2000s”.* 1998. P. 277.
21. *Kotov Yu.A.* // *J. Nanopart. Res.* 2003. V. 5. P. 539.
<https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000006069.45073.0b>
22. *Kotov Yu.A.* // *Nanotechnol. Russia.* 2009. V. 4. P. 415.
<https://doi.org/10.1134/S1995078009070039>
23. *Gregg S.J., Sing K.S.W.* *Adsorption, Surface Area and Porosity.* New York: Acad. Press, 1982. 303 p.
24. *Carrique F., Arroyo F.J., Jimenez M.L. et al.* // *J. Phys. Chem. B.* 2003. V. 107. № 14. P. 3199.
<https://doi.org/10.1021/jp027148k>
25. *Felix C., Yaroshchuk A., Pasupathi S. et al.* // *Adv. Colloid. Interface Sci.* 2014. V. 211. P. 77.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.06.005>
26. *O'Brien R.W., White L.R.* // *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 2.* 1978. V. 74. P. 1607.
<https://doi.org/10.1039/F29787401607>
27. *Bhattacharjee S.* // *J. Control. Release.* 2016. V. 235. P. 337.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
28. *Besra L., Uchikoshi T., Suzuki T.S. et al.* // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2010. V. 30. № 5. P. 1187.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.07.004>
29. *Ammam M.* // *RSC Adv.* 2012. V. 2. P. 7633.
<https://doi.org/10.1039/c2ra01342h>
30. *Koelmans H., Overbeek J.T.G.* // *Disc. Faraday Soc.* 1954. V. 18. P. 53.
<https://doi.org/10.1039/DF9541800052>
31. *Besra L., Liu M.* // *Progr. Mater. Sci.* 2007. V. 52. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.07.001>