НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2020, том 56, № 9, с. 993–1000

УДК 544.6.018.42-16

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УСТОЙЧИВЫХ СУСПЕНЗИЙ ПОРОШКОВ ZrO_2–Y_2O_3 РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

© 2020 г. Е. Г. Калинина[1, 2, *], Е. Ю. Пикалова[2, 3]

[1]Институт электрофизики УрО Российской академии наук, ул. Амундсена, 106, Екатеринбург, 620016 Россия

[2]Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

[3]Институт высокотемпературной электрохимии УрО Российской академии наук, ул. Академическая, 20, Екатеринбург, 620137 Россия

*e-mail: jelen456@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2019 г.
После доработки 03.02.2020 г.
Принята к публикации 20.04.2020 г.

В работе представлены результаты исследования неводных суспензий на основе порошков ZrO_2–8 мол. % Y_2O_3 (8YSZ) и их последующего применения для формирования тонкопленочных покрытий на подложке La_2NiO_4 (LNO) методом электрофоретического осаждения (ЭФО). Устойчивые суспензии для ЭФО были приготовлены на основе порошков 8YSZ различной морфологии и дисперсности: нанопорошка (YSZ_L), полученного методом лазерного испарения конденсации, и коммерческого порошка компании Tosoh (Япония) (YSZ_T). Установлено различное влияние ультразвуковой обработки на дисперсный состав суспензий YSZ_L и YSZ_T. Обнаружено существенное различие в кинетике тока при осаждении (постоянное напряжение) из двух типов суспензий: для суспензии YSZ_L наблюдалось увеличение тока, для суспензии YSZ_T – заметное падение тока от времени осаждения. Показано, что пленка YSZ_L более плотная по сравнению с пленкой YSZ_T и после спекания при 1350°C представляет собой покрытие с полностью сформированными зернами размерами от 1 до 5 мкм. Для устранения поверхностных пор в покрытии YSZ_T спекание необходимо проводить при температуре 1450°C.

Ключевые слова: электрофоретическое осаждение, устойчивая суспензия, агрегаты, YSZ, тонкая пленка

DOI: 10.31857/S0002337X20090092

ВВЕДЕНИЕ

Среди известных коллоидных методов формирования тонких пленок наиболее технологически гибкой и привлекательной технологией является электрофоретическое осаждение (**ЭФО**) [1, 2]. Технология ЭФО включает получение устойчивой суспензии дисперсного керамического материала в жидкости и ее осаждение на поверхность электрода-подложки под действием постоянного электрического поля напряженностью 10–100 В/см с последующим спеканием. Метод инструментально прост, легко приспособляем к форме покрываемой поверхности и обладает высокой производительностью [3]. В частности, метод ЭФО может быть успешно применен для формирования тонкопленочных электролитов в технологии твердооксидных топливных элементов (**ТОТЭ**) на анодных и катодных подложках [4–8]. Тем не менее, для получения воспроизводимых результатов и масштабирования метода ЭФО требуется изучение фундаментальных закономерностей получения устойчивых суспензий для ЭФО, что позволяет получать однородные газоплотные покрытия [9].

В работах [4, 5] описано применение коммерческого порошка YSZ фирмы Tosoh для приготовления суспензий с последующим проведением ЭФО и получения плотных покрытий на пористых подложках LSM и NiO–YSZ. В представленных работах для суспензий порошка YSZ использовали различные дисперсионные среды: этанол, ацетилацетон, ацетон, смесь ацетона и этанола с добавлением диспергантов (полиэтиленимин) или зарядовых агентов (молекулярный иод). В работе [4] использовали длительный размол шарами для гомогенизации суспензии.

В работе [6] использовали другой коммерческий порошок фирмы Nanostructured and Amorphous Materials Inc. с размером частиц 51–65 нм. Дисперсионной средой для суспензии являлась смесь ацетилацетона и этанола, авторы проводили длительный размол шарами в течение 48 ч с последующей ультразвуковой обработкой (**УЗО**). В работе [7] золь–гель-методом синтезировали порошок YSZ с размером частиц 22 нм. Суспензия была приготовлена в изопропиловом спирте с размолом в планетарной мельнице в течение 6 ч, затем был добавлен дисперсант (фосфатный эфир) и проведены длительный размол (24 ч) с последующей УЗО.

В качестве характерных особенностей вышеприведенных способов приготовления суспензий для ЭФО на основе порошков YSZ можно выделить использование дисперсантов, зарядового агента (молекулярный иод) и применение размола шарами, несмотря на достаточно малый размер частиц исходного порошка [6, 7]. В описанных работах недостаточно исследован дисперсный состав частиц и их агрегатов в жидкой среде, который непосредственно влияет на процесс ЭФО и формирование покрытий. Интерес представляют также кинетика дезагрегации суспензии при проведении УЗО и исследование возможности избежать использования органических дисперсантов или зарядовых агентов при приготовлении устойчивых суспензий для ЭФО.

Важным фактором при практическом применении метода ЭФО является взаимосвязь между происхождением исходных порошков (методом получения), их свойствами и особенностями приготовления суспензий на их основе [10].

Целью настоящей работы являлось сравнение свойств суспензий, кинетики процесса ЭФО покрытий на основе наноразмерного порошка YSZ, полученного методом лазерного испарения и конденсации (**ЛИК**) в лаборатории импульсных процессов Института электрофизики УрО РАН, и коммерческого порошка YSZ от компании Tosoh. Полученные суспензии были использованы для проведения ЭФО на катодную подложку на основе La_2NiO_4 (LNO), выявлены специфика дезагрегации суспензий, особенности кинетики процесса ЭФО и изменение морфологии получаемых покрытий в зависимости от свойств суспензий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Нанопорошок YSZ_L был получен методом испарения при нагреве керамической мишени излучением импульсного CO_2-лазера с последующей конденсацией в циклоне [3, 11]. Керамическая мишень была изготовлена из порошка YSZ, полученного традиционным твердофазным методом, с последующим прессованием при 300 МПа и спеканием при 1300°C, 3 ч аналогично таковой из порошков других материалов [12].

В качестве другого объекта исследования был использован коммерческий порошок YSZ_T (Tosoh, Япония). Морфологию порошков исследовали с помощью трансмиссионного электронного микроскопа JEOL JEM 2100 и сканирующего электронного микроскопа Tescan LYRA 3. Рентгенофазовый анализ (**РФА**) порошков проводили на дифрактометре D8 DISCOVER в медном излучении с графитовым монохроматором на дифрагированном луче. Обработку выполняли с использованием программы TOPAS-3 с ритвельдовским алгоритмом уточнения структурных параметров. Удельную поверхность порошков определяли объемным вариантом метода БЭТ по низкотемпературной равновесной сорбции паров азота из смеси с гелием на вакуумной сорбционной установке Micromeritics TriStar 3000.

Для катодной подложки был выбран материал $La_2NiO_{4\pm\delta}$ (LNO), поскольку он совместим с материалом электролита по значению линейного коэффициента температурного расширения (КТР ≈ ≈ 12.9×10^{-6} K^{-1}) и характеризуется высокими значениями общей проводимости (~80 См/см при 800°C), ионной проводимости (~4 мСм/см при 800°C), коэффициента поверхностного обмена кислорода k и коэффициента диффузии D^* (2.55×10^{-6} см/с и 1.71×10^{-7} см^2/с при 800°C), что существенно для обеспечения эффективного функционирования катода со смешанной проводимостью [13–15]. Для синтеза LNO применялся керамический метод, чтобы снизить активность материала к спеканию и максимально сблизить температуры спекания электролита и катодной подложки [16, 17]. По данным РФА, после окончательного синтеза LNO являлся однофазным, с орторомбической структурой (пр. гр. *Fmmm*) и параметрами решетки $a = 5.448$ (1) Å, $b = 5.477$ (1) Å, $c = 12.667$ (8) Å. После окончательного синтеза LNO измельчали до удельной поверхности $S_{уд} = 1$ м^2/г с помощью планетарной мельницы Pulverisette-6, формировали диски методом полусухого прессования при давлении 100 МПа и проводили спекание при температуре 1450°C, 3 ч. Удельная плотность подложек, оцененная из их размеров и массы, составила 80% от теоретической, рассчитанной из данных РФА. Подложки LNO были отполированы, очищены в ультразвуковой ванне, отожжены при 900°C в течение 1 ч и использованы для проведения ЭФО.

Суспензии для ЭФО были приготовлены на основе порошков YSZ_L и YSZ_T с использованием смешанной дисперсионной среды (изопропиловый спирт “ос. ч.”, “Компонент-Реактив”, Москва/ацетилацетон “ч. д. а.”, Merck) (50/50 об. %). Сополимер бутилметакрилата с добавлением 5 мол. % метакриловой кислоты

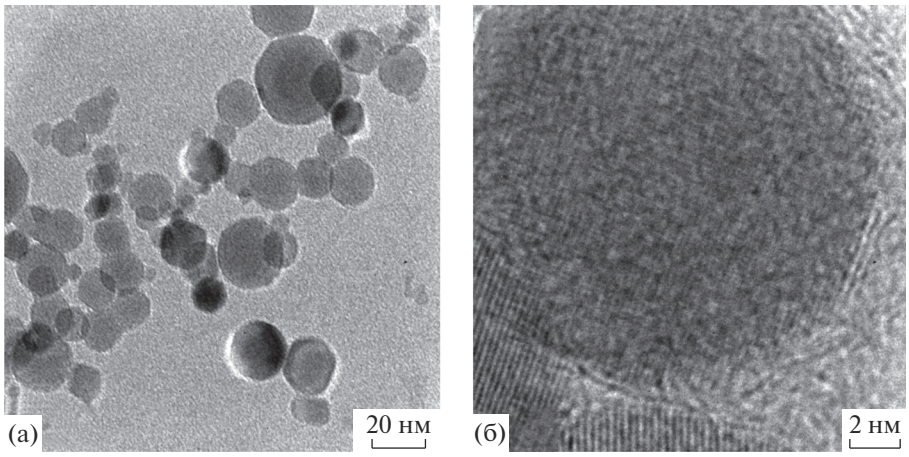

Рис. 1. Микрофотографии нанопорошка (а) и отдельной частицы (б) YSZ_L.

(БМК-5) добавляли в суспензию, чтобы избежать растрескивания осажденных покрытий во время сушки [16]. Суспензии концентрацией 1 и 10 г/л готовили по точной навеске порошка и обрабатывали ультразвуком с помощью ультразвуковой ванны УЗВ-13/150-ТН в течение 5–125 мин с контролем среднего размера частиц/агрегатов. Размер частиц и дзета-потенциал в суспензиях измеряли с помощью анализатора частиц Brookhaven ZetaPlus, использующего методы динамического и электрофоретического рассеяния света. Все измерения проводили в изотермических условиях на воздухе при температуре 25°C.

ЭФО выполняли на специализированной компьютеризированной установке, обеспечивающей режимы постоянства тока или напряжения, которая была разработана и изготовлена в лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН. Катодом служила модельная плотная подложка из LNO площадью 12 мм^2, в качестве анода использовали диск из нержавеющей стали аналогичного размера, расстояние между электродами составляло 1 см. Микроструктуру пленок YSZ изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (Tescan Mira 3 LMU).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частицы порошка YSZ_L имели преимущественно правильную сферическую форму (рис. 1). Среднечисловой диаметр частиц, рассчитанный методом обработки электронных изображений, составлял 11 нм. Удельная поверхность YSZ, полученная методом БЭТ, составляла $S_{уд}$ = 54.6 м^2/г. Для сферических частиц значение удельной поверхности позволяет рассчитать средний диаметр частиц по формуле [18]

$$d_{БЭТ} = \frac{6}{\rho S_{уд}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала (ρ_{YSZ} = 6.1 г/см^3). Средний диаметр частиц YSZ_L, вычисленный по формуле (1), составил 18 нм. Согласно данным РФА, нанопорошок являлся однофазным и представлял собой твердый раствор на основе ZrO_2 кубической структуры с параметром решетки a = = 5.145(2) Å и размером кристаллитов ОКР = = 25(2) нм.

Микрофотография порошка YSZ_T представлена на рис. 2. Порошок характеризуется правильной сферической формой частиц. Удельная поверхность YSZ_T $S_{уд}$ = 16.8 м^2/г. Средний диаметр частиц YSZ_T, вычисленный по формуле (1), 58 нм.

Суспензии на основе порошков YSZ_L и YSZ_T были приготовлены в смешанной дисперсионной среде изопропанол/ацетилацетон (50/50 об. %), проведена оценка дисперсности частиц в суспензиях. На рис. 3 представлена зависимость эффективного гидродинамического диаметра агрегатов d_{eff} для суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T с концентрацией 1 г/л в зависимости от времени УЗО с непрерывным охлаждением суспензии. Из рис. 3 видно, что зависимость эффективного гидродинамического диаметра агрегатов от времени УЗО для суспензии YSZ_T лежит выше, чем для суспензии YSZ_L. Начальное значение d_{eff} для суспензии YSZ_T составляет 228 нм, тогда как для суспензии YSZ_L оно составило 237 нм. В процессе УЗО размер агрегатов в суспензии YSZ_L закономерно снижается, выходя на насыщение. Минимальный предельный размер 108 нм достигается через 125 мин УЗО. Таким образом, УЗО не позволяет деагрегировать частицы полностью, однако гидродинамический размер агрегатов в процессе УЗО существенно понижается. Данная тенденция наблюдается также для других материалов, полученных как методом ЛИК, так и с применением химической технологии [16, 19]. В

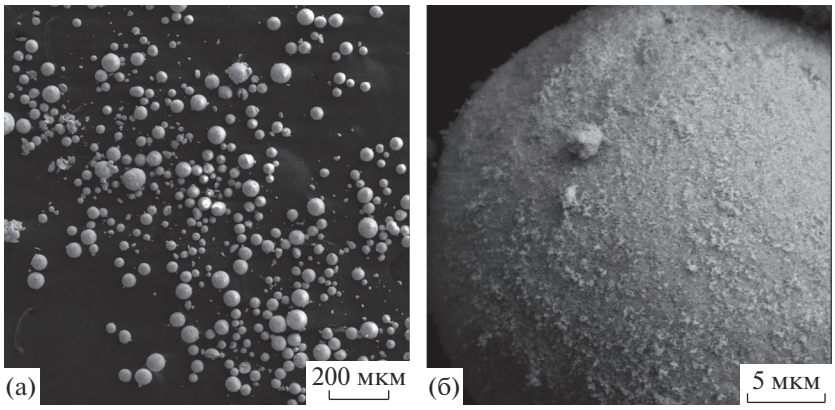

Рис. 2. Микрофотографии порошка (а) и отдельной частицы (б) YSZ_T.

то время как для суспензии YSZ_T d_{eff} от времени УЗО увеличился незначительно – до 236 нм, что может быть связано с особенностями морфологии частиц порошка YSZ_T (рис. 2), обусловленной условиями получения материала, подробности которых нам неизвестны.

Унимодальные распределения частиц по интенсивности рассеяния неводных суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T после обработки ультразвуком в течение 5–125 мин (рис. 4) показали, что при увеличении времени УЗО для суспензии YSZ_L происходит сужение распределений, что подтверждается значениями GSD (геометрическое стандартное отклонение), которое является параметром ширины распределения и связано со среднеквадратичным отклонением по формуле $\sigma = \ln(GSD)$. Таким образом, для суспензий YSZ_L, обработанных ультразвуком в течение 5, 25, 125 мин, *GSD* составило 1.62 ± 0.07, 1.57 ± 0.07 и 1.50 ± 0.07 соответственно. В свою очередь для суспензий YSZ_T обработка ультразвуком в течение 5, 25, 125 мин не дала видимого эффекта, что подтверждается значениями GSD, которые в пределах ошибки измерений практически не меняются и составляют 1.40 ± 0.07, 1.47 ± 0.07 и 1.44 ± 0.07 соответственно.

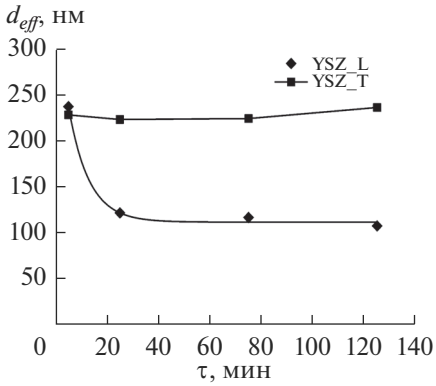

Рис. 3. Зависимости эффективного гидродинамического диаметра агрегатов в суспензиях порошков YSZ_L и YSZ_T от времени непрерывной УЗО.

Результаты определения фракционного состава для суспензий исследованных порошков YSZ_L и YSZ_T приведены в табл. 1. Из табл. 1 можно сделать вывод, что УЗО суспензии YSZ_L позволяет уменьшить размер с 102 до 55 нм и увеличить долю агрегатов первой фракции с 8.5 до 85%. Иная картина наблюдается для суспензии YSZ_T: при УЗО происходит увеличение среднего размера агрегатов первой и второй фракций.

Дзета-потенциал является ключевым показателем, характеризующим устойчивость суспензий [9, 10]. Измерения дзета-потенциала в суспензиях YSZ_L и YSZ_T проводили методом электрофоретического рассеяния света. Суспензии порошков YSZ_L и YSZ_T в смешанной дисперсионной среде имели одинаковые положительные значения дзета-потенциала +27 мВ, достаточные для проведения ЭФО, поскольку данные суспензии соответствовали критерию устойчивости [10, 20]. С учетом довольно низких значений эффективного гидродинамического диаметра частиц в суспензиях (как было показано выше – 108 и 228 нм для YSZ_L и YSZ_T соответственно) полученные результаты исследования физико-химических свойств суспензий показывают их применимость для осуществления процесса ЭФО.

Проведено измерение вольт-амперных характеристик (**ВАХ**) в диапазоне напряжений от 12 до 150 В для суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T (10 г/л) в смешанной дисперсионной среде с добавлением 3 и 0.8 г/л БМК-5 соответственно. Для каждой суспензии было выбрано минимальное количество БМК-5 для обеспечения отсутствия трещин при сушке покрытия. Для обеих суспензий сила тока линейно зависит от напряжения, т.е. сопротивление ячейки не зависит от напряжения в данном диапазоне. Нелинейность и гистерезис ВАХ

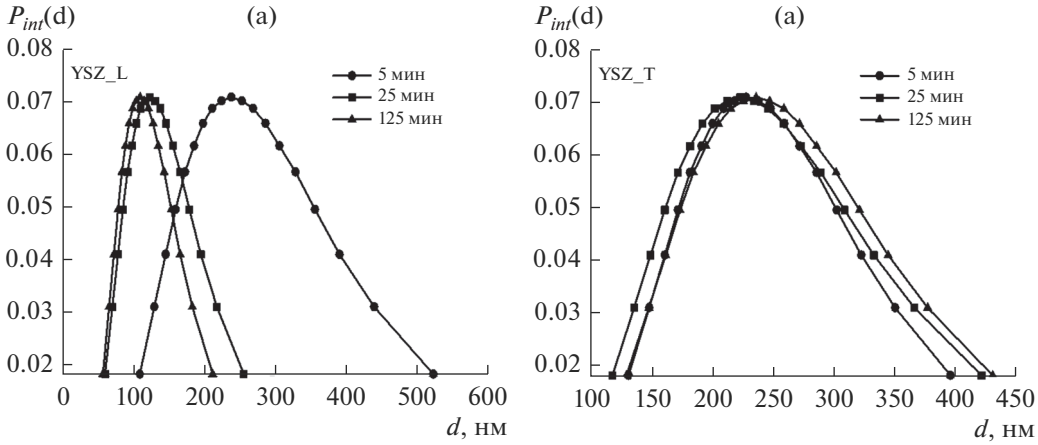

Рис. 4. Унимодальные распределения для суспензий YSZ_L и YSZ_T при непрерывной УЗО в течение 5, 25 и 125 мин.

при исследовании данных суспензий не обнаружены, в отличие от ВАХ для суспензии микрометрового порошка $BaCe_{0.89}Gd_{0.1}Cu_{0.01}O_{3-\delta}$ (BCGCuO), полученной в работе [19]. Линейный характер ВАХ соответствует постоянной электрофоретической подвижности частиц в суспензии, тогда как возникновение нелинейности ВАХ связано с зависимостью электрофоретической подвижности от напряженности внешнего электрического поля вследствие возникающего перераспределения зарядов в диффузной части двойного электрического слоя при увеличении напряженности поля [10, 21]. ВАХ при проведении ЭФО для суспензии нанопорошка YSZ_T характеризуется более высоким сопротивлением постоянному току по сравнению с суспензией YSZ_L, несмотря на то что в суспензию YSZ_T было добавлено меньшее количество БМК-5, поскольку при увеличении количества связующего сопротивление суспензии увеличивается. Вероятная причина разного сопротивления ячейки заключается в различии способа получения частиц исходного порошка, что сказалось на значении эффективного гидродинамического размера агрегатов в суспензиях и, возможно, на ионном составе дисперсионной среды.

На рис. 5 представлены зависимости силы тока от времени (напряжение 80 В) при ЭФО тонкопленочных покрытий из суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T в смешанной дисперсионной среде с добавлением БМК-5. Видно, что зависимости силы тока от времени при проведении ЭФО из суспензий двух различных порошков принципиально разные: для суспензии YSZ_L наблюдается некоторое увеличение силы тока от 0.766 ± 0.001 до 0.793 ± ± 0.001 мА, в то время как для образца суспензии YSZ_T происходит снижение силы тока с 0.175 ± 0.001 до 0.127 ± 0.001 мА в интервале времени от 0 до 190 с. Для суспензии YSZ_T имеющаяся тенденция падения тока со временем, возможно, обусловлена ростом сопротивления слоя осадка и обеднением суспензии. При этом для суспензии YSZ_L в рассматриваемом интервале времени, вероятно, процессы роста сопротивления слоя осадка и обеднения суспензии не оказывают существенного влияния на кинетику тока в процессе ЭФО, что может быть связано с влиянием ионного переноса заряда в суспензии. Также можно предпо-

Таблица 1. Результаты фракционного состава суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T в смешанной дисперсионной среде изопропанол/ацетилацетон = 50/50 об. %

Суспензия	Время УЗО, мин	Средний размер первой фракции агрегатов, нм	Доля первой фракции агрегатов, %	Средний размер второй фракции агрегатов, нм	Доля второй фракции агрегатов, %
YSZ_L	5	102	8.5	440	91.5
	25	64	88.6	203	11.4
	125	55	85	152	15
YSZ_T	5	105	41.3	282	58.7
	25	132	41	339	59
	125	140	40	304	60

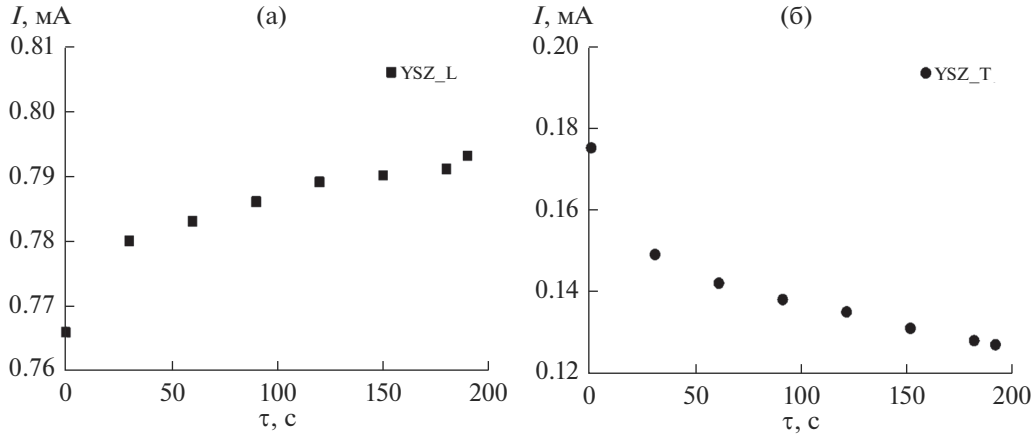

Рис. 5. Зависимости силы тока от времени при постоянном напряжении 80 В при ЭФО из суспензий порошков YSZ_L и YSZ_T.

лагать в качестве механизма осаждения процесс электрохимической коагуляции частиц [22] вблизи электрода и увеличения локальной концентрации ионов, что должно сопровождаться изменением проводимости суспензии.

Для получения пленок 8YSZ было проведено циклическое ЭФО (2 цикла) из суспензий YSZ_L и YSZ_T при постоянном напряжении 80 В и токе осаждения в диапазоне от 0.175 ± 0.001 до 0.793 ± ± 0.001 мА/см^2. Время осаждения составляло 1 мин. Масса неспеченного слоя в каждом цикле составляла 1.2–2.0 мг/см^2 геометрической поверхности катода-подложки. После получения покрытия осажденный слой уплотняли в центрифуге со скоростью 1000 об./мин в течение 2 мин, сушили при 25°C в чашке Петри при медленном удалении растворителя и затем спекали. Общая масса пленок YSZ_L и YSZ_T после финального спекания составляла 2.5 и 1.5 мг/см^2, что соответствует толщине покрытий 4 и 2.5 мкм.

Согласно данным электронной микроскопии, после заключительной стадии спекания при температуре 1350°C в течение 4 ч (рис. 6а) пленка на основе нанопорошка YSZ_L была плотной, с полностью сформированными зернами размером от 1 до 5 мкм и небольшими порами размером менее 1 мкм, которые не являются сквозными, поскольку при циклическом ЭФО происходит зале-

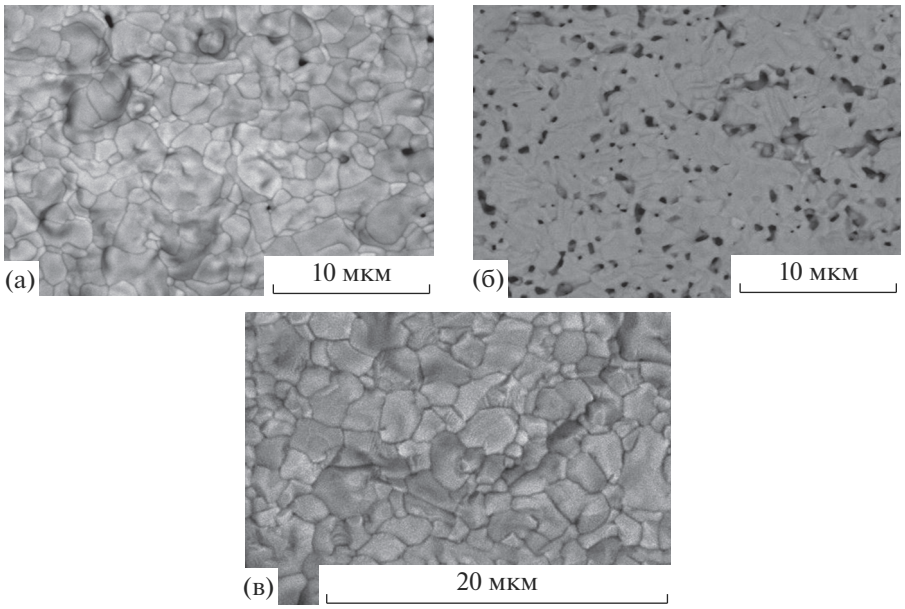

Рис. 6. Электронные микрофотографии поверхности покрытий YSZ_L (а), YSZ_T (б), спеченных при температуре 1350°C, 4 ч, и YSZ_T (в) – при 1450°C, 2 ч.

чивание пор на поверхности пленки. Пленка на основе порошка YSZ_T, осажденная и спеченная с использованием тех же технологических режимов ЭФО, имела структуру с нечетко выраженными размытыми зернами и многочисленными порами (до 1 мкм) и их скоплениями размером до 3 мкм (рис. 6б). Такое различие в структуре покрытий обусловлено морфологией используемых порошков YSZ и суспензий, приготовленных на их основе, для которых эффективный гидродинамический диаметр агрегатов отличается практически в два раза. Другой причиной такой морфологии пленки YSZ_T, возможно, является недостаточная для спекания температура, равная 1350°C. Возможно, коммерческие порошки, несмотря на их мелкодисперсность, были получены с применением прокаливания при очень высоких температурах, что сказывается на результатах УЗО (невозможность разрушения агрегатов) и на качестве пленки, получаемой на их основе (требование более высоких температур спекания). С целью изменения микроструктуры пленки на основе порошка YSZ_T, а именно: формирования хорошо развитой зеренной структуры и уменьшения количества крупных пор было проведено спекание при более высокой температуре 1450°C в течение 2 ч (рис. 6в). Сформирована плотная пленка YSZ_T (рис. 6в) с зеренной структурой (размер зерен составил 1–7 мкм) и отсутствием пор, что является определяющим фактором потенциального использования тонкопленочных покрытий на основе порошков YSZ_T и YSZ_L в качестве твердых электролитов ТОТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением комплекса физико-химических методов проведены исследования неводных суспензий на основе порошков 8YSZ, полученных методом испарения лазером (YSZ_L), и коммерческого материала фирмы Tosoh (YSZ_T). Изучены особенности процесса ЭФО при формировании пленок на плотных модельных подложках LNO. Методами УЗО получены устойчивые суспензии на основе порошков YSZ_L и YSZ_T в смешанной дисперсионной среде изопропанол/ацетилацетон (50/50 об. %) без дополнительного использования диспергантов и зарядов агентов.

Показано, что суспензии порошков характеризуются высокими положительными значениями дзета-потенциала, равного +27 мВ, что является достаточным для проведения ЭФО. Проведена оценка дисперсности частиц в суспензиях с использованием двух различных порошков и показано существенное различие в кинетике дезагрегации.

Показано, что для обеих суспензий сила тока линейно зависит от напряжения, т.е. сопротивление ячейки не зависит от напряжения в диапазоне от 12 до 150 В. Обнаружено существенное различие в кинетике тока ЭФО при постоянном напряжении для двух типов суспензий, а именно: в процессе осаждения из суспензии YSZ_L наблюдается увеличение тока, тогда как для суспензии YSZ_T происходило заметное падение тока от времени. Установлено, что после циклического ЭФО в две стадии общая масса спеченных покрытий YSZ_L и YSZ_T составила 2.5 и 1.5 мг/см^2, что соответствует толщине пленок 4 и 2.5 мкм.

По результатам электронной микроскопии показано отличие в структуре покрытий на основе порошков YSZ_L и YSZ_T, спеченных при температуре 1350°C, 4 ч. Установлено, что покрытие на основе материала фирмы Tosoh требует более высоких температур спекания (1450°C, 2 ч).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят А.П. Сафронова (УрФУ, Екатеринбург) за помощь в проведении анализов по изучению размеров частиц в суспензиях, А.А. Кудрявцева (ООО “ТЕСКАН”, Санкт-Петербург), А.С. Фарленкова (ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург) за микроструктурные исследования.

Работа была частично выполнена с использованием оборудования коллективных центров ИЭФ УрО РАН и ИВТЭ УрО РАН (“Состав вещества”).

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИЭФ УрО РАН и тематики по развитию ТОТЭ технологии в ИВТЭ УрО РАН.

Авторы благодарны правительству Российской Федерации за всестороннюю поддержку их работы (02.A03.21.0006, Act 211).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Besra L., Liu M.* A Review on Fundamentals and Applications of Electrophoretic Deposition (EPD) // Prog. Mater. Sci. 2007. V. 52. P. 1–61. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.07.001
2. *Corni I., Ryan M.P., Boccaccini A.R.* Electrophoretic Deposition: from Traditional Ceramics to Nanotechnology // J. Eur. Ceram. Soc. 2008. V. 28. P. 1353–1367. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.011
3. *Pikalova E., Kalinina E.* Place of Electrophoretic Deposition among Thin-Film Methods Adapted to the Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Short Review // Int. J. Energy Prod. Manage. 2019. V. 4. № 1. P. 1–27. https://doi.org/10.2495/EQ-V4-N1-1-27
4. *Will J., Hruschka M.M., Gubler L., Gauckler L.J.* Electrophoretic Deposition of Zirconia on Porous Anodic Substrates // J. Am. Ceram. Soc. 2001. V. 84. № 2. P. 328–332. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00658.x
5. *Chen F., Liu M.* Preparation of Yttria-Stabilised Zirconia (YSZ) Films on $La_{0.85}Sr_{0.15}MnO_3$ (LSM) and LSM-YSZ Substrate Using an Electrophoretic Deposition (EPD) Process // J. Eur. Ceram. Soc. 2001. V. 21. P. 127–134. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00195-3

6. *Xu Z., Rajaram G., Sankar J., Pai D.* Electrophoretic Deposition of YSZ Electrolyte Coatings for SOFCs // Fuel Cells Bull. 2007. P. 12–16. https://doi.org/10.1016/S1464-2859(07)70114-1
7. *Das D., Bagchi B., Basu R.N.* Nanostructured Zirconia Thin Film Fabricated by Electrophoretic Deposition Technique // J. Alloys Compd. 2017. V. 693. P. 1220–1230. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.088
8. *Kalinina E.G., Efimov A.A., Safronov, A.P.* The Influence of Nanoparticle Aggregation on Formation of ZrO_2 Electrolyte Thin Films by Electrophoretic Deposition // Thin Solid Films. 2016. V. 612. P. 66–71. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.05.039
9. *Pikalova E.Yu., Kalinina E.G.* Electrophoretic Deposition in the Solid Oxide Fuel Cell Technology: Fundamentals and Recent Advances // Renew. Sust. Energ. Rev. 2019. V. 116. P. 109440. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109440
10. *Калинина Е.Г., Пикалова Е.Ю.* Новые тенденции в развитии метода электрофоретического осаждения в технологии твердооксидных топливных элементов: теоретические подходы, экспериментальные решения и перспективы развития // Russ. Chem. Rev. 2019. V. 88. № 12. P. 1179–1219. https://doi.org/10.1070/RCR4889
11. *Kotov Yu.A., Osipov V.V., Ivanov M.G., Samatov O.M., Platonov V.V., Lisenkov V.V., Murzakayev A.M., Medvedev A.I., Azarkevich E.I., Shtolz A.K., Timoshenkova O.R.* Properties of YSZ and CeGdO Nanopowders Prepared by Target Evaporasion with a Pulse-Repetitive CO_2-laser // Rev. Adv. Mater. Sci. 2003. V. 5. P. 171–177.
12. *Пикалова Е.Ю., Никонов А.В., Журавлев В.Д., Бамбуров В.Г., Саматов О.М., Липилин А.С., Хрустов В.Р., Николаенко И.В., Плаксин С.В., Молчанова Н.Г.* Влияние метода синтеза на физико-химические свойства $Ce_{0.8}(Sm_{0.75}Sr_{0.2}Ba_{0.05})_{0.2}O_{2-\delta}$ // Неорган. материалы. 2011. Т. 47. № 4. С. 452–457. https://doi.org/10.1134/S0020168511040170
13. *Boehm E., Bassat J.-M., Dordor P., Mauvy F., Grenier J.-C., Stevens Ph.* Oxygen Diffusion and Transport Properties in Non-Stoichiometric $Ln_{2-x}NiO_{4+\delta}$ Oxides // Solid State Ionics. 2005. V. 176. P. 2717–2725. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2005.06.033
14. *Shen Y., Zhao H., Liu X., Xu N.* Preparation and Electrical Properties of Ca-Doped $La_2NiO_{4+\delta}$ Cathode Materials for IT-SOFC // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. P. 15124–15131. https://doi.org/10.1039/C0CP00261E
15. *Kolchugin A.A., Pikalova E.Yu., Bogdanovich N.M., Bronin D.I., Pikalov S.M., Plaksin S.V., Ananyev M.V., Eremin V.A.* Structural, Electrical and Electrochemical Properties of Calcium-Doped Lanthanum Nickelate // Solid State Ionics. 2016. V. 288. P. 48–53. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.01.035
16. *Kalinina E.G., Pikalova E.Yu., Menshikova A.V., Nikolaenko I.V.* Electrophoretic Deposition of a Self-Stabilizing Suspension Based on a Nanosized Multicomponent Electrolyte Powder Prepared by the Laser Evaporation Method // Solid State Ionics. 2016. V. 288. P. 110–114. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2015.12.008
17. *Kalinina E.G., Pikalova E.Yu., Kolchugin A.A., Pikalov S.M., Kaigorodov A.S.* Cyclic Electrophoretic Deposition of Electrolyte Thin-Films on the Porous Cathode Substrate Utilizing Stable Suspensions of Nanopowders // Solid State Ionics. 2017. V. 302. P. 126–132. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.01.016
18. *Gregg S.J., Sing K.S.W.* Adsorption, Surface Area and Porosity. N.Y.: Academic Press, 1982. P. 304.
19. *Калинина Е.Г., Пикалова Е.Ю., Журавлев В.Д., Щербинин С.В., Сафронов А.П.* Агрегативно устойчивые суспензии микрометровых порошков допированного цената бария для целей электрофоретического осаждения тонкопленочных покрытий твердооксидных топливных элементов // Журн. прикл. химии. 2017. Т. 90. № 6. С. 705–712. https://doi.org/10.1134/S1070427217060052
20. *Bhattacharjee S.* DLS and Zeta Potential – What They are and What They are Not? // J. Controlled Release. 2016. V. 235. P. 337–351. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017
21. *Stotz S.* Field Dependence of the Electrophoretic Mobility of Particles Suspended in Low-Conductivity Liquids // J. Colloid Interface Sci. 1978. V. 65. № 1. P. 118–130. https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90264-3
22. *Koelmans H., Overbeek J.T.G.* Stability and Elecrophoretic Deposition of Suspensions in Non-Aqueous Media // Discuss. Faradey Soc. 1954. V. 18. P. 53–63. https://doi.org/10.1039/df9541800052