УДК 621.352.6

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ СОВМЕСТНОГО СПЕКАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ¹

© 2016 г. И. Н. Бурмистров*, Д. А. Агарков, Ф. М. Цыбров, С. И. Бредихин

ФГБУН Институт физики твердого тела РАН 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, Россия *e-mail: buril@issp.ac.ru Поступила в редакцию 24.07.2015 г.

Описаны результаты разработки методик формирования мембранно-электродных блоков (МЭБ) твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) методом совместного спекания электродов и электрохимических испытаний МЭБ. В качестве мембраны твердого электролита были использованы пластины из материала HionicTM (Fuel Cell Materials, США) площадью $50 \times 50 \text{ мm}^2$. Слои катода изготавливались на основе катион-дефицитного манганита лантана-стронция и анионного проводника 89 мол. % ZrO_2-10 мол. % Sc_2O_3-1 мол. % CeO_2 (10Sc1CeSZ) с добавлением сажи для управления микроструктурой. Анодные слои были сформированы на основе композита NiO/10Sc1CeSZ и введением в качестве порообразователя в анодном токосъемном слое рисового крахмала. На основе данных термогравиметрии, сканирующей электронной микроскопии и результатов испытания электрохимических характеристик ТОТЭ оптимизирован режим термообработки, обеспечиваю-

Ключевые слова: твердооксидные топливные элементы, мембранно-электродные блоки, совместное спекание, электроды, вольт-амперные характеристики

щий формирование электрохимически активных электродов с использованием одного термоцикла.

DOI: 10.7868/S0424857016070057

введение

Твердооксидные топливные элементы (**ТОТЭ**) – перспективные источники энергии, преобразующие химическую энергию топлива в электроэнергию и тепловую энергию. Одним из вариантов реализации батарей ТОТЭ является электролит-поддерживающая конструкция, в которой мембрана твердого электролита имеет наибольшую из компонентов ТОТЭ толщину и несет на себе основные механические нагрузки [1].

Для увеличения доли электрохимически активной поверхности мембран ТОТЭ, ограниченных конструкционными элементами и высокотемпературным герметиком, необходимо увеличить площадь твердоэлектролитной мембраны; при этом ее толщина, как правило, не превышает 150 мкм. Одновременное увеличение геометрической площади и уменьшение толщины несущей мембраны существенно ограничивает возможность использования метода последовательного формирования электродных слоев, требующего серии высокотемпературных обработок при различных температурах. При последовательном формировании электродов в электролите возникают механические напряжения [2, 3], которые приводят к значительной деформации несущей основы вплоть до ее разрушения [4, 5]. Одним из подходов, позволяющим изготовить мембранноэлектродный блок (МЭБ) электролит-поддерживающей конструкции большой геометрической площади, является метод совместного спекания электродов. Данный метод заключается в формировании МЭБ за один цикл температурной обработки, когда механические напряжения, возникающие в мембране при спекании катодных и анодных слоев, компенсируют друг друга [6, 7].

Ранее мы представили результаты работ по изготовлению МЭБ ТОТЭ методом раздельного спекания электродов [8, 9]. Аноды были изготовлены на основе композитов NiO и флюоритоподобного твердого раствора состава 89 мол. % ZrO_2 –10 мол. % Sc_2O_3 –1 мол. % CeO_2 (**10Sc1CeSZ**) с массовым соотношением фаз 40/60 и 60/40, температура спекания составляла 1380°С. Для катодных слоев был использован композит ($La_{0.8}Sr_{0.2}$)_{0.95}MnO₃/10Sc1CeSZ и однофазный перовскит ($La_{0.8}Sr_{0.2}$)_{0.95}MnO₃ (LSM), которые спекались при 1100°С для предотвращения образова-

¹ Публикуется по материалам III Всероссийской конференции "Топливные элементы и энергоустановки на их основе", Черноголовка, 2015.

ния реакционных слоев с высоким сопротивлением и сохранения высокой удельной площади поверхности. Для модельных ТОТЭ небольшого размера удельная мощность, снимаемая при рабочей температуре 850°С, достигала 400 мВт/см² [8]. Однако электрохимические характеристики значительно ухудшались при использовании твердоэлектролитных мембран большого размера [9].

Данная работа посвящена разработке технологии изготовления МЭБ ТОТЭ методом совместного спекания электродов и исследованию их электрохимических характеристик.

МЕТОДИКИ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Образцы МЭБ изготавливали на основе мембран производства Fuel Cell Materials (США). Мембраны из анионного проводника HionicTM имели квадратную форму со скругленными углами; сторона квадрата – 50 мм, толщина мембраны – 150 мкм. Катодные слои изготавливали из высокодисперсного порошка 10Sc1CeSZ (DKKK, Япония) и катион-дефицитного манганита (La_{0.8}Sr_{0.2})_{0.95}MnO₃ (LSM), синтезированного по цитратной технологии. Для оптимизации микроструктуры была использована канальная сажа К-354 производства "Спектр-Хим" (Россия). Композиционные анодные слои изготавливались с использованием порошков 10Sc1CeSZ и NiO (Sigma-Aldrich). В качестве порообразователя в анодном токосъемном слое использовался рисовый крахмал (Beneo, Бельгия).

Однофазный высокодисперсный порошок LSM был синтезирован цитратным методом [10, 11] из La(NO₃)₃ · 6H₂O, Sr(NO₃)₂, Mn(CH₃COO)₂ · 4H₂O и моногидрата лимонной кислоты. Финальный отжиг после синтеза проводили на воздухе при 1100°C с выдержкой 5 ч.

Для приготовления композитов смеси исходных соединений проходили многостадийные перемолы в шаровой мельнице Pulverisette 5 (Fritsch, Германия). Перемолы производились в емкости из частично стабилизированного ZrO_2 с использованием шаров из того же материала диаметром 3 и 10 мм; в качестве среды для помола выступала смесь толуола/бутанола/диэтиладипината с объемным соотношением 70/30/2 и добавлением диаминопропана, выступающего в роли поверхностно-активного вещества, в количестве 3 мас. %.

Пасты для трафаретной печати были изготовлены с применением органического связующего Негаеus V-006A (Германия). В функциональном и токосъемном анодных слоях использовалось соотношение порошок : связующее 1 : 0.4 и 1 : 0.5 соответственно, а в функциональном и токосъемном катодных слоях — 1 : 0.8 и 1 : 1 соответственно. Данные соотношения были оптимизированы ранее [12]. Многостадийные перемешивания для гомогенизации и дегазации были проведены в планетарном миксере ARE 250 производства Thinky (Япония). Электродные пасты наносились на мембраны твердого электролита методом трафаретной печати с использованием станка Ekra Mat S45 производства (Ekra, Германия) через трафареты производства "А-Десайн" (Россия).

Рентгенографический анализ исходных материалов производился с помощью дифрактометра Siemens D-500-Braun X02-1787 (Си $K_{\alpha 1}$ -излучение, шаг 0.02°, интервал углов $20^\circ \le 2\theta \le 90^\circ$) производства Siemens (Германия). Морфология исходных порошков, а также микроструктура мембран твердого электролита и электродных слоев были исследованы с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с полевым эмитирующим катодом LEO Supra 50VP, оборудованного системой микроанализа INCA Energy+ для исследований методом рентгенофлюоресцентного спектрального микроанализа. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения проводились с помощью микроскопа Jeol JEM 2100 (Япония). Для термогравиметрических исследований порообразователей и связующего применяли термогравиметрический анализатор Setsys EVO 16/18 (Setaram, Франция).

Исследования электрохимических характеристик МЭБ проводили с помощью установки TrueXessory-HT (FuelCon, Германия) и газотемпературного стенда, обеспечивающего контроль рабочей температуры, а также потока и состава окислительной и восстановительной газовых смесей. Годографы импедансных спектров были измерены в диапазоне частот от 0.1 Гц до 1 МГц с помощью потенциостата-гальваностата Autolab 302N с модулем FRA32M 2-электродным 4-контактным методом, позволяющим исключить сопротивление токоподводящих проводов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мембранно-электродные блоки

Для повышения эффективности работы ТОТЭ оба электрода состояли из двух слоев, отличающихся составом и микроструктурой. Прилегающий к несущему электролиту слой (функциональный) был оптимизирован для эффективного протекания окислительно-восстановительных реакций. В задачи внешнего (токосъемного) электродного слоя входит распределение газовых потоков реагентов и продуктов реакции, а также снижение слоевого сопротивления электронному току.

Катоды. Структура и морфология синтезированного LSM, составляющего основу катодов ТОТЭ, были исследованы методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной





Рис. 1. Порошковая дифрактограмма LSM (а) и СЭМ-изображение частиц порошка (б).

микроскопии. Порошковая дифрактограмма и СЭМ-изображение приведены на рис. 1. Анализ показал, что синтезированный LSM является однофазным и имеет структуру ромбоэдрического перовскита (a = 0.5478(3) нм, V = 0.1176 нм³). Порошок манганита состоит из частиц субмикронного размера (0.1-0.8 мкм), объединенных в агломераты размером до 5 мкм, что позволяет использовать его для приготовления токосъемного слоя катодного электрода. Для применения такого порошка в функциональном слое электрода требуется предварительная деагломерация путем перемола.

Для приготовления токосъемного слоя был использован чистый LSM, не подвергавшийся предварительному размолу в планетарной мельнице. Функциональный слой катодов изготавливали на основе композита с весовым соотношением LSM/10Sc1CeSZ = 60/40%. Для оптимизации микроструктуры в состав композита вводили



Рис. 2. СЭМ-изображения порошка 10Sc1CeSZ (а) и канальной сажи (б).

15 мас. % канальной сажи, выступающей в качестве порообразователя. Выбор сажи обусловлен близостью размеров частиц порообразователя и оксидных компонентов (рис. 16, рис. 2). Это позволяет избежать появления в функциональном слое катода крупных пор, снижающих общую протяженность трехфазной границы между электродом, твердым электролитом и газовой фазой. Для приготовления композиционной смеси навески исходных порошков LSM, 10Sc1CeSZ и канальной сажи подвергались предварительному совместному помолу в планетарной мельнице с последующей гомогенизацией смеси в двухосевом миксере.

Аноды. Анодные слои были изготовлены на основе композита 10Sc1CeSZ и NiO. Соотношение этих фаз в функциональном и токосъемном слоях анода было оптимизировано ранее [13, 14] и составляло 40/60 и 60/40 мас. % соответственно. В состав токосъемного слоя вводилось 10 мас. % рисового крахмала, выступающего в качестве порообразователя.

Необходимо отметить, что исходный нанопорошок оксида никеля (Aldrich, <50 нм) не пригоден к использованию для приготовления элек-

ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 52 № 7 2016

(a) (b) (b) (c) (c)

Рис. 3. ПЭМ-изображение исходного NiO (а) и СЭМизображение порошка NiO, отожженого при 650°С (б).

тродных паст и требует предварительной подготовки. Как было показано в предшествующей работе [15], частицы наноструктурированного NiO имеют структуру типа "ядро—оболочка" (рис. 3а). Аморфная оболочка частиц характеризуется присутствием адсорбированной воды и сверхстехиометрического кислорода, которые должны быть удалены. По этой причине порошок оксида никеля, используемый в функциональном и токосъемном слоях анода, проходил предварительный отжиг при температурах 650 и 900°С соответственно.

СЭМ-изображение порошка NiO после отжига при 650°С в течение 1 ч показано на рис. 3б. После термообработки размер частиц оксида никеля составляет 50–100 нм, что является сравнимым с размерами частиц порошка 10Sc1CeSZ (рис. 2а). Для приготовления композиционной смеси функционального слоев навески NiO и 10Sc1CeSZ подвергались совместному помолу с последующей гомогенизацией в миксере.

Для повышения газопроницаемости токосъемного слоя анодов обычно используют порообразователи, при сгорании которых в электродном слое формируется система магистральных



Рис. 4. СЭМ-изображения порошков рисового (а) и картофельного (б) крахмала.

пор. На рис. 4 приводятся СЭМ-изображения порошков рисового и картофельного крахмала, которые рассматривались для данной цели. Частицы картофельного крахмала (рис. 46) имеют широкое распределение по размерам; при этом присутствуют отдельные частицы размером до 70 микрон, что существенно превышает толщину токосъемного слоя. Частицы рисового крахмала имеют форму неправильных многогранников, средний размер которых составляет 3–5 мкм. Этот размер хорошо подходит для создания развитой системы магистральных пор.

Для определения оптимального количества рисового крахмала, вводимого в токосъемный слой анода, была приготовлена серия образцов с содержанием крахмала 0, 5, 7.5, 10, 12.5 и 15 мас. % [16]. СЭМ-изображения поперечного сечения анодного электрода с содержанием крахмала 0, 5, 10 и 15% представлены на рис. 5.

Из рисунков видно, что в исходном образце, изготовленном без использования порообразователя, присутствует развитая система пор с характерным размером около 1 мкм (рис. 5а). При добавлении 5 мас. % рисового крахмала (рис. 5б) наряду с мелкой пористостью появляются крупные



Рис. 5. СЭМ-изображения образцов с разным массовым содержанием рисового крахмала в токосъемном анодном слое: 0 (а), 5 (б), 10 (в) и 15% (г).

поры размером до 5 мкм, однако система крупных пор не является связной. Увеличение доли рисового крахмала до 10 мас. % (рис. 5в) приводит к появлению связной развитой системы магистральных пор. При дальнейшем увеличении содержания крахмала до 15% (рис. 5г) происходит рост как доли, так и среднего размера крупных пор, что может приводить к резкому ухудшению механических и электропроводных свойств токосъемного слоя. По этой причине оптимальное массовое содержание рисового крахмала в токосъемном слое анодного электрода ТОТЭ составляет около 10% массы. Смесь порошков NiO, 10Sc1CeSZ и крахмала проходила совместный помол в планетарной мельнице, а затем гомогенизировалась в двухосевом миксере.

Выбор режима термообработки

Для оптимизации стадии нагрева в ходе выбора режима высокотемпературного отжига МЭБ рисовый крахмал, канальная сажа и органическое связующее были исследованы методом термогравиметрического анализа. Измерения проводились в воздушной атмосфере при скорости нагрева 2 К/мин. На рис. 6 представлены температур-

ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 52 № 7 2016

ные зависимости массы и ее первой производной. Для полного сжигания рисового крахмала требуется температура не ниже 480° С. При этом можно выделить 3 этапа потери массы. Незначительное изменение массы при нагреве до 200° С, вероятно, объясняется потерей сорбированной воды. Компоненты крахмала интенсивно сгорают в температурном интервале от 250 до 300° С и менее интенсивно – от 300 до 480° С. Канальная сажа полностью сгорает при нагреве до 720° С. Потеря массы начинается при температуре около 375° С, и далее процесс набирает скорость до 600° С.

На рис. 7 представлены термогравиметрические данные по сгоранию связующего Heraeus V006-А. Основная потеря массы происходит в температурном диапазоне от 100 до 250°С. Оставшиеся 10% сгорают в интервале до 400°С.

По результатам термогравиметрического анализа был определен оптимальный режим нагрева во время высокотемпературного отжига мембранно-электродных блоков ТОТЭ. Первый этап нагрева до 250°С проводился с высокой скоростью за 1 ч, поскольку летучие компоненты связующего Heraeus V-006А предварительно удаляются во время сушек на воздухе при 130°С, которые



Рис. 6. Результаты термогравиметрического анализа рисового крахмала (а) и канальной сажи (б).

проходят после нанесения каждого из 4 электродных слоев. Для удаления тяжелой компоненты органического связующего, а также порошков порообразователей: рисового крахмала и канальной сажи, нагрев до температуры 750°С производился со скоростью 100 К/ч.

Наиболее важным параметром высокотемпературного отжига при совместном спекании электродов становится выбор максимальной температуры термообработки. В случае использования метода последовательного спекания электродов температура отжига анодов, как правило, лежит в области выше 1300°С, что позволяет сформировать хорошо спеченный кермет, обеспечивающий в рабочих условиях ТОТЭ достаточную плотность трехфазной границы в сочетании с хорошей прочностью. Предварительные исследования показали, что при снижении температуры



Рис. 7. Результаты термогравиметрического анализа связующего Heraeus V006А.



Рис. 8. СЭМ-изображение катодного электрода ТОТЭ, приготовленного без использования порообразователей и спеченного при температуре 1155°С.

формирования анодного электрода ниже 1170°С. электрохимические характеристики ТОТЭ демонстрируют быструю деградацию, объясняемую, очевидно, низкой плотностью сформированных электродных слоев и, как следствие, ухудшением электропроводящих свойств возможным И ухудшением локальных контактов. Температура формирования катодных слоев существенно ограничена возможностью химического взаимодействия катодного материала с материалом твердоэлектролитной мембраны и, как правило, не должна превышать 1150°С. Использование катион-дефицитного манганита лантана-стронция позволяет существенно подавить такое взаимодействие; однако, как видно из рис. 8, повышение температуры спекания выше 1150°С приводит к заметному снижению пористости композитного функционального слоя катода. По этой причине для повышения температуры формирования ка-



Рис. 9. СЭМ-изображения катодного электрода ТОТЭ, приготовленного с применением порообразователей и спеченного при 1165 (а) и 1175°С (б).

тодных слоев требуется обязательное введение порообразователей.

Как видно из рис. 9, использование 15% массы канальной сажи в качестве порообразователя в композите функционального слоя катода позволяет существенно повысить долю пор при спекании вплоть до температуры 1170°С. Температура 1170°С была выбрана в качестве оптимальной температуры высокотемпературного отжига для совместного спекания электродов ТОТЭ.

По результатам термогравиметрического анализа порообразователей и связующего, а также по результатам оптимизации температуры финального отжига был построен оптимальный режим высокотемпературного отжига МЭБ ТОТЭ. Зависимость температуры отжига от времени показана на рис. 10.

Микроструктурные и электрохимические характеристики МЭБ

После оптимизации морфологии исходных материалов, состава электродных композитов и режима температурной обработки была изготов-

ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 52 № 7 2016



Рис. 10. Режим высокотемпературного отжига мембранно-электродных блоков для совместного формирования электродов.

лена серия мембранно-электродных блоков ТОТЭ методом совместного спекания электродов. Фотографии образцов МЭБ ТОТЭ приведены на рис. 11.

Поперечное сечение модельных образцов было исследовано методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 12). Из рисунка видно, что слои имеют равномерную толщину. Функциональный катодный слой имеет толщину около 10 мкм, а токосъемный — около 20 мкм. Анодный электрод состоит из функционального и токосъемного слоев толщиной около 20 мкм каждый.

На рис. 13 приводятся СЭМ-изображения отдельно катода (а) и анода (б), полученные при большем увеличении. Как сами электродные слои, так и межфазные границы достаточно хорошо спечены. В токосъемных слоях электродов имеется развитая система магистральных пор размером более 3 мкм, а функциональные слои сформированы частицами субмикронного размера. Стоит отметить, что использование канальной сажи в качестве порообразователя при приготовлении функционального слоя катодов ТОТЭ позволило избежать значительного увеличения среднего размера частиц манганита лантана-стронция и 10Sc1CeSZ, однако объем пор может быть недостаточным.

Электрохимические характеристики мембранно-электродных блоков, изготовленных методом совместного спекания электродов, исследовались при 850°С. Топливная смесь состояла из водорода и азота с парциальными давлениями 0.5 атм. В качестве окислительной смеси исполь-



Рис. 11. Фотографии мембранно-электродных блоков ТОТЭ, изготовленных методом совместного спекания электродов.

зовалась смеси кислорода и азота с парциальным давлением кислорода 0.21 атм (искусственный воздух) и 0.5 атм. Вольт-амперные и мощностные характеристики МЭБ ТОТЭ показаны на рис. 14. При использовании воздуха в качестве окислителя максимальная мощность, снимаемая с МЭБ, составила свыше 3.6 Вт (удельная мощность 225 мВт/см²). Стоит обратить внимание, что данное значение снимаемой мощности было достигнуто при напряжении 0.7 В, а сопротивление подводящих проводов и особенности измерительной



Рис. 12. СЭМ-изображение поперечного сечения МЭБ ТОТЭ, изготовленного методом совместного спекания электродов.



Рис. 13. СЭМ-изображение катодного (а) и анодного (б) электродов МЭБ ТОТЭ, изготовленного методом совместного спекания электродов.



Рис. 14. Вольт-амперная и мощностная характеристики МЭБ ТОТЭ, изготовленного методом совместного спекания электродов: *1*, $I' - P(H_2) = 0.5$ бар, $P(O_2) = 0.21$ бар; *2*, $2' - P(H_2) = 0.5$ бар, $P(O_2) = 0.21$ бар.



Рис. 15. Годографы импедансных спектров МЭБ ТОТЭ с электродами площадью 4×4 см².

станции не позволили пройти через максимум мощности. При использовании более богатой окислительной смеси снимаемая мощность превышает 4.2 Вт (260 мВт/см²). Заметное улучшение электрохимических характеристик при повышении парциального давления кислорода, вероятно, объясняется наличием диффузионных затруднений на катоде топливного элемента.

Для определения составляющих полного сопротивления МЭБ ТОТЭ в тех же рабочих условиях были исследованы годографы импедансного спектра. Некоторые результаты приведены на рис. 15. Видно, что омическая часть импедансного спектра составляет около 0.05 Ом (0.8 Ом см²), а поляризационная — 0.06 Ом (1.0 Ом см²) в случае использования богатой окислительной смеси и около 0.07 Ом (1.1 Ом см²) для искусственного воздуха. При этом следует отметить, что изменение парциального давления кислорода оказывает

ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 52 № 7 2016

существенное влияние именно на низкочастотную часть годографа, обычно связываемую с диффузионным вкладом в поляризационное сопротивление. Это подтверждает ранее сделанное предположение о наличии диффузионных затруднений на катоде ТОТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки технологии изготовления МЭБ ТОТЭ методом совместного спекания электролов. Ланная технология позволяет компенсировать механические напряжения, возникающие в твердоэлектролитной мембране во время высокотемпературного отжига. Проведенные электрохимические исследования показывают, что максимальная удельная мощность, снимаемая с МЭБ, составляет 225 мВт/см² при рабочей температуре 850°С и напряжении на элементе 0.7 В. Исследования зависимости годографа импедансного спектра от парциального давления кислорода свидетельствуют о наличии газовых затруднений на катодах, которые, вероятно, связаны с недостаточной пористостью функционального слоя. Дальнейшая работа будет связана с оптимизацией микроструктуры данного слоя с целью повышения плотности мощности, снимаемой с МЭБ ТОТЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержки Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и технологий", уникальный идентификатор Соглашения RFMEFI61014X0007, и проекта РФФИ 13-03-12408.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ivers-Tiffee E., Weber A., Herbstritt D. // J. Europ. Ceram. Soc. 2001. V. 21. P. 1805.
- Selimovic A., Kemm M., Torisson T., Assadi M. // J. Power Sources. 2005. V. 145. P. 463.
- Nakajo A., Stiller C., Harkegard G., Bolland O. // J. Power Sources. 2006. V. 148. P. 287.
- Anam K., Lin C.K. // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 493. P. 331.
- Bouhala L., Belouettar S., Makradi A., Remond Y. // Mater. Design. 2010. V. 31. P. 1033.
- Muller A.C., Herbstritt D., Ivers-Tiffee E. // Solid State Ionics. 2002. V. 152. P. 537.
- Mucke R., Menzler M.H., Buchkremer H.P., Stover D. // J. Amer. Ceram. Soc. V. 92. P. S95.
- Burmistrov I., Agarkov D., Bredikhin S., Nepochatov Yu., Tiunova O., Zadorozhnaya O. // ECST. 2013. V. 57. P. 917.
- Тиунова О.В., Задорожная О.Ю., Непочатов Ю.К., Бурмистров И.Н., Курицына И.Е., Бредихин С.И. // Электрохимия. 2014. Т. 50. С. 807. [Tiunova O.V., Zadorozhnaya O.Yu., Nepochatov Yu.K., Burmistrov I.N.,

Kuritsina I.E., Bredikhin S.I. // Russ. J. Electrochem. 2014. V. 50. P. 719.]

- Kolotygin V.A., Tsipis E.V., Ivanov A.I., Fedotov Y.A., Burmistrov I.N., Agarkov D.A., Sinitsyn V.V., Bredikhin S.I., Kharton V.V. // J. Solid State Electrochem. 2012. V. 16. P. 2335.
- 11. Иванов А.И., Агарков Д.А., Бурмистров И.Н., Кудренко Е.А., Бредихин С.И., Хартон В.В. // Электрохимия. 2014. Т. 50. С. 814. [Ivanov A.I., Agarkov D.A., Burmistrov I.N., Kudrenko E.A., Bredikhin S.I., Kharton V.V. // Russ. J. Electrochem. 2014. V. 50. P. 730.]
- 12. *Агарков Д.А.* // Дис. магистра. Черноголовка: ИФТТ РАН, 2013.

- 13. Bredikhin I., Sinitsyn V., Aronin A., Kutitsina I., Bredikhin S. // ECST. 2007. V. 7. P. 1541.
- Bredikhin I., Bredikhin S., Kveder V. // ECST. 2009. V. 25. P. 1967.
- 15. Burmistrov I.N., Agarkov D.A., Tartakovskii I.I., Kharton V.V., Bredikhin S.I. // ECST. 2015. V. 68. P. 1265.
- 16. Зайцева Д.В., Агарков Д.А., Бурмистров И.Н., Бредихин С.И. // Тез. докл. конф. Всероссийская конференция с международным участием "Топливные элементы и энергоустановки на их основе". Черноголовка: ИФТТ РАН, 2015. С. 128.