

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

УДК 53.091, 54-722, 54-724

DOI: 10.31660/0445-0108-2024-3-135-147

**Изучение фазовой эволюции и микроструктурных особенностей
при моделировании условий эксплуатации топливных элементов
на основе соединений феррита лантана — стронция**

Д. Б. Боргеков¹, К. Б. Калиекперова¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Г. Ж. Молдабаева³

¹Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан

²Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Республика Казахстан

³Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

*Kozlovskiy.a@inp.kz

Аннотация. Интерес к керамикам на основе феррита лантана — стронция, обладающих смешанной электронной и кислород-ионной проводимостью, а также хорошей стабильностью, обусловлен большим потенциалом применения в качестве электродных материалов для твердооксидных топливных элементов. В работе представлены результаты оценки изменений морфологии и фазового состава керамик на основе соединений феррита лантана — стронция, полученных методом твердофазного синтеза при моделировании условий, максимально приближенных к условиям их эксплуатации в режиме повышенных температур. Основной упор в исследованиях сделан на изменении соотношения фазового состава керамик при длительном термическом воздействии, моделирующем процессы термического старения, и, как следствие, процессы окисления, возникающие при длительных циклических испытаниях. В ходе проведенных исследований было определено, что наличие в составе керамик фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к увеличению устойчивости к коррозионным процессам окисления при высокотемпературной коррозии. Согласно полученным данным оценки изменения электрохимических характеристик керамик в зависимости от времени выдержки при моделировании высокотемпературной деградации, было установлено, что наиболее значимые снижения наблюдаются после 400 часов последовательных испытаний при температуре 500–600 °С и после 250–300 часов при температурах выше 700 °С. При этом снижение величины удельной мощности обусловлено формированием оксидных включений в керамиках, возникающих в результате разложения фазы $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})\text{FeO}_4$ в составе керамик. В свою очередь, наличие фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к формированию устойчивой к окислению структуры, приводящей к менее выраженным изменениям удельной мощности при измерении параметров электрохимических характеристик.

Ключевые слова: высокотемпературная коррозия, деградация, топливные элементы, деструкция, окислительные процессы

Благодарности: данная работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. AP13068071).

Для цитирования: Изучение фазовой эволюции и микроструктурных особенностей при моделировании условий эксплуатации топливных элементов на основе соединений феррита лантана — стронция / Д. Б. Боргеков, К. Б. Калиекперова, А. Л. Козловский, Г. Ж. Молдабаева. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-3-135-147 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 3. – С. 135–147.

**Study of phase evolution and microstructural features when modeling
operating conditions of fuel cells based on lanthanum-strontium
ferrite compounds**

Daryn B. Borgekov¹, Kamila B. Kaliyekperova¹, Artem L. Kozlovskiy^{1,2*},
Gulnaz Zh. Moldabayeva³

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan

²Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, the Republic of Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

*Kozlovskiy.a@inp.kz

Abstract. Interest in lanthanum-strontium ferrite ceramics having mixed electron and oxygen-ion conductivity as well as good stability is due to the great potential for use as electrode materials for solid oxide fuel cells. The article presents the results of an assessment of alterations in the morphology and phase composition of ceramics based on lanthanum-strontium ferrite compounds obtained by solid-phase synthesis. This was done during simulation of conditions as close as possible to their operating conditions in the mode of elevated temperatures. The primary objective of the research is to alter the ratio of the phase composition of ceramics under prolonged thermal exposure, simulating thermal ageing processes, and thus, oxidation processes that occur during long-term cyclic tests. The studies revealed that the presence of the $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ phase in the composition of ceramics results in enhanced resistance to corrosive oxidation processes during high-temperature corrosion. The data obtained on the change in the electrochemical characteristics of ceramics depending on the exposure time during the simulation of high-temperature degradation revealed that the most significant decreases were observed after 400-500 hours of consecutive tests at a temperature of 500-600 °C and after 250-300 hours at temperatures above 700 °C. Moreover, the reduction in the specific power is due to the formation of oxide inclusions in ceramics, resulting from the decomposition of the $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})\text{FeO}_4$ phase in the composition of the ceramics. In turn, the presence of the $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ phase results in the formation of an oxidation-resistant structure, leading to less pronounced changes in specific power during measurement of parameters of electrochemical characteristics.

Keywords: high-temperature corrosion, degradation, fuel cells, destruction, oxidative processes

Acknowledgments: this study was funded with support from the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (No. AP13068071).

For citation: Borgekov, D. B., Kaliyekperova, K. B., Kozlovskiy, A. L., & Moldabaeva, G. Zh. (2024). Study of phase evolution and microstructural features when modeling operating conditions of fuel cells based on lanthanum-strontium ferrite compounds. *Oil and Gas Studies*, (3), pp. 135-147. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-3-135-147

Введение

Интерес к перовскитным или перовскитоподобным керамикам на основе ферритов, имеющих смешанный тип проводимости (кислород-ионной и электронной), в последние несколько лет достаточно большой ввиду открывающихся перспектив использования их в качестве электродных материалов для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [1–3]. При этом одним из перспективных материалов в данном направлении являются перовскитоподобные керамики на основе феррита лантана — стронция, имеющего, согласно ряду экспериментальных работ, достаточно хорошие показатели стабильности и работоспособности в условиях эксплуатации при повышенных температурах, которая обусловлена структурными особенностями и фазовым составом керамик [4–6].

Одной из ключевых проблем повсеместного использования твердооксидных топливных элементов для производства водорода в области альтернативных источников энергии является проблема высокотемпературной деградации катодных материалов, приводящая к деструктивному охрупчиванию и снижению электрохимических и емкостных характеристик [7–9]. При этом условия эксплуатации ТОТЭ элементов подразумевают работу при высоких температурах порядка 500–800 °C, что не позволяет исключить эффект высокотемпературной деградации и требует учитывать факторы разупрочнения при определении потенциала использования катодных материалов [10]. Как правило, эксплуатация при высоких температурах

сопровождается инициализацией процессов окисления за счет изменения амплитуды колебания атомов в кристаллической решетке, что, как следствие, приводит к увеличению подвижности атомов и возможности внедрения в узлы и междоузлия кислорода или водорода, что впоследствии приводит к формированию примесных включений в виде оксидных или гидроксидных фаз [11–14]. Формирование подобных включений в керамиках в ходе их эксплуатации может привести как к деструктивному изменению прочностных свойств, связанных с разупрочнением приповерхностных слоев, наиболее подверженных окислению, так и к дестабилизации структуры керамик за счет образования деформационных искажений приповерхностного слоя, в котором происходит накопление оксидных примесей. В свою очередь, дестабилизация приповерхностных слоев оказывает негативное влияние на перенос заряда, способствует изменению диэлектрических и электрохимических параметров керамик, что, в свою очередь, может привести к деструктивному поведению работоспособности катодного материала и всего топливного элемента, а также к снижению производительности [12–14].

Цель исследований заключается в определении механизмов деградации керамических материалов на основе феррита лантана — стронция, связанных с процессами высокотемпературного воздействия, сравнимого с режимами эксплуатации в случае использования их в качестве катодных материалов для ТОТЭ элементов.

Объект и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны керамики на основе соединений феррита лантана — стронция, полученные методом механохимического твердофазного перемалывания с последующим термическим спеканием. При этом изменение фазового состава исследуемых керамик производилось путем изменения соотношения химических соединений, используемых для получения керамик, вариация которых позволила получить высокопрочные керамики с двумя или тремя фазами. В качестве компонент для получения керамик были выбраны соединения SrCO_3 , $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3$, обладающие химической чистотой порядка 99,95 %. Вариация компонент с целью определения изменений фазового состава керамик была осуществлена путем изменения концентрации $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ в составе керамик от 0,1 до 0,25 М. Механохимический твердофазный синтез был осуществлен с применением планетарной мельницы PULVERISETTE 6 classic line planetary mill (Fritsch, Idar-Oberstein, Germany). Перемалывание было осуществлено при скорости 400 оборот/мин в течение 1 часа. После перемалывания полученные смеси были отожжены при температуре 1 000 °С в течение 5 часов, остывание образцов до достижения комнатной температуры было осуществлено в течение 24 часов при нахождении образцов внутри печи.

Для определения фазового состава керамик в зависимости от условий получения был применен метод рентгенофазового анализа, реализованный с использованием порошкового дифрактометра D8 ADVANCE ECO (Bruker, Karlsruhe, Germany). Съемка рентгеновских дифрактограмм проводилась в геометрии Брегг-Брентано, в угловом диапазоне $2\theta = 20\text{--}80^\circ$ с шагом $0,03^\circ$ и временем набора спектра в точке 1 сек.

Моделирование процессов эксплуатации с целью определения влияния высокотемпературного воздействия на изменение электрохимических параметров проводилось с использованием метода длительного термического воздействия, сравнимого с условиями эксплуатации данных керамик в качестве катодных материалов ТОТЭ элементов. Термический отжиг образцов с целью определения механизмов деградации, связанных с температурным воздействием, был осуществлен в муфельной печи при температуре $500\text{--}800^\circ\text{C}$ в течение 500 часов, с измерением фазового состава, электрохимических параметров и твердости после каждых 50 часов испытаний.

Стабильность фазового состава исследуемых керамик, полученных методом механохимического твердофазного синтеза, к высокотемпературной деградации оценивалась путем сравнительного анализа изменений соотношения фаз в составе керамик с последующим определением фактора стабильности фазового состава ($\Phi_{\text{фазовый состав}}$). Данный фактор был определен как изменение соотношения весовых вкладов каждой фазы в образцах в зависимости от температуры и времени температурного воздействия на образцы с учетом образующихся оксидных включений при длительном воздействии. Снижение величины $\Phi_{\text{фазовый состав}}$ вызвано формированием оксидных включений, наличие которых обусловлено окислительными процессами и разложением фаз в результате термического воздействия.

Изготовление ТОТЭ элемента было осуществлено по стандартной технологии получения трехслойных устройств, где в качестве электролита был использован порошок $\text{Sm}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{2-\delta}$ в концентрации 0,20 г, спрессованный с синтезированной керамикой и никелевой пеной, в качестве воздушного электрода использовались синтезированные керамики и пеноникель ($\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{LiO}_{2-\delta}$). В качестве анода был также использован пеноникель. После прессования полученные устройства отжигали при температуре 600°C в течение 4 часов в атмосфере аргона для уплотнения ТОТЭ. Демонстрация работоспособности элементов была проведена в увлажненном водородном топливе 3 % H_2O и воздухе с атмосферными окислителями, при скорости дрейфа $\text{H}_2/\text{воздуха}$ $100 \pm 5\%$ мл/мин [15]. Для определения влияния устойчивости керамик к деградации при высокотемпературном окислении на сохранение работоспособности все образцы были подвергнуты измерению зависимостей кривых характеристик плотности тока — удельной мощности до и после высокотемпературных испытаний.

Определение прочностных параметров керамик в зависимости от условий и времени температурного воздействия было осуществлено путем

измерений значений твердости керамик и последующего сравнительного анализа с исходными значениями, что позволило как определить устойчивость керамик к высокотемпературной деградации, так и оценить влияние формирования оксидных включений на эффекты разупрочнения керамик. Измерение твердости проводилось с использованием стандартной методики индентирования, реализованной с помощью микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Bursa, Turkey). В качестве индентера использовалась алмазная пирамида Виккерса, применение которой при постоянной нагрузке на образец позволило получить данные о твердости образца в ходе экспериментов на определение влияния температуры и времени воздействия прочностных параметров и факторов разупрочнения.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты рентгенофазового анализа, отражающие изменение фазового состава керамик в зависимости от вариаций соотношения компонент, связанных с изменением содержания лантана в составе керамик.

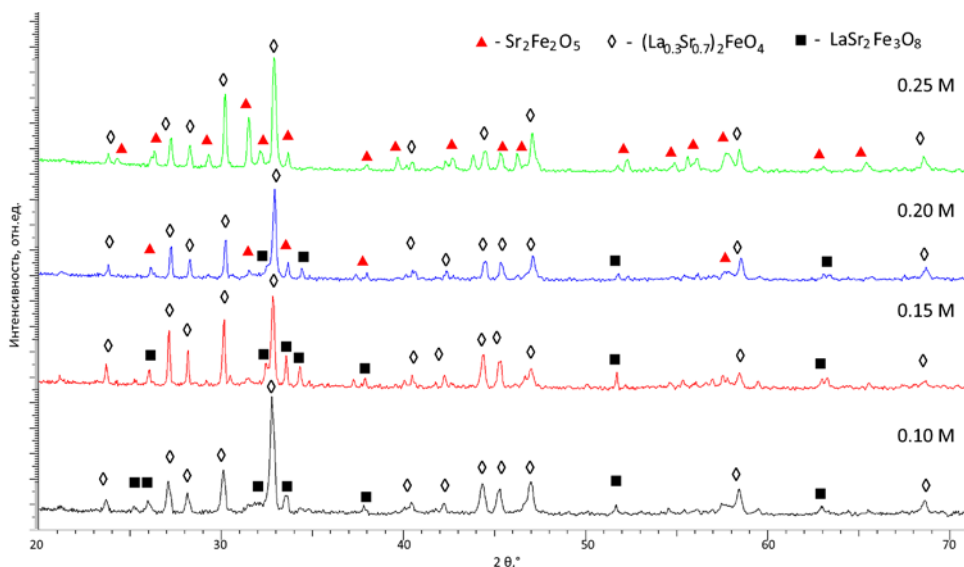


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа исследуемых керамик на основе феррита лантана — стронция

Как видно из представленных данных на рентгеновской дифрактограмме, при концентрации $\text{La}(\text{NO}_3)_3$, равной 0,1 М, фазовый состав керамик представлен доминирующей фазой $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})\text{FeO}_4$ с тетрагональным типом кристаллической структуры, а также включениями в виде орторомбической фазы $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$, содержание которой, согласно оценке весовых вкладов, составляет не более 30 вес. %. Изменение концентрации лантана в составе керамик, согласно приведенным данным рентгенофазового анализа, приводит к вытеснению из состава $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$ фазы с последующим

увеличением вклада орторомбической фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, формирование которой наблюдается при концентрации $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ выше 0,2 М в составе керамик. При этом в случае концентрации 0,2 М фазовый состав керамик представлен тремя фазами: тетрагональной фазой $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})\text{FeO}_4$, весовой вклад которой составляет порядка 80 %, и двумя орторомбическими фазами $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$ и $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$.

Согласно представленным данным рентгенофазового анализа керамик на основе феррита лантана — стронция, было установлено, что увеличение концентрации лантана в составе керамик приводит к вытеснению фазы $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$ и формированию орторомбической фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, пространственной сингонии $\text{Icmm}(74)$, содержание которой увеличивается с 10 до 28 вес. %.

На рисунке 2 представлены результаты изменения фактора $\Phi_{\text{фазовый состав}}$ в зависимости от условий экспериментов, моделирующих высокотемпературную деградацию для всех четырех типов исследуемых керамик.

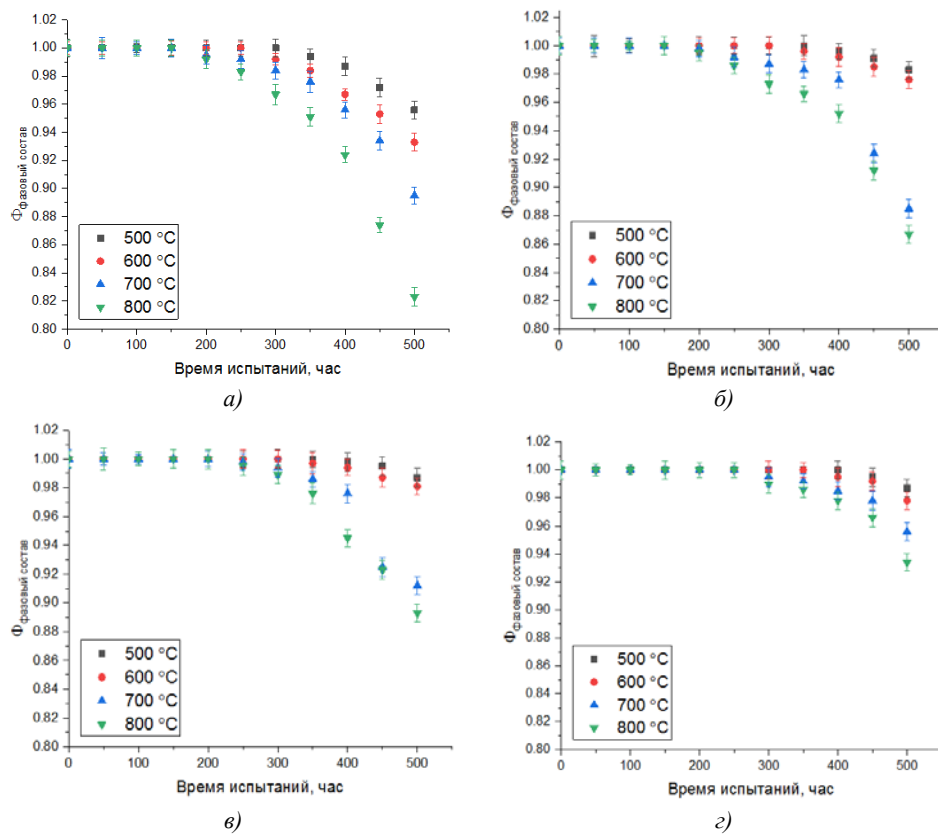


Рис. 2. Зависимость изменения фактора $\Phi_{\text{фазовый состав}}$ от условий высокотемпературных испытаний для исследуемых керамик, полученных с различным содержанием $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ в составе: а) 0,1 М; б) 0,15 М; в) 0,20 М; г) 0,25 М

Как видно из представленных данных, изменение величины $\Phi_{\text{фазовый состав}}$ становится наиболее выраженным в двух случаях: во-первых, при увеличении времени испытаний выше 200–300 часов; во-вторых, при

увеличении температуры нагрева образцов. В первом случае снижение величины $\Phi_{\text{фазовый состав}}$ обусловлено изменениями, связанными с накопительным эффектом процессов окисления, выраженных в частичном разложении фазы $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4$ с образованием оксидов железа и лантана, концентрация которых приводит не только к изменению фазового состава керамик, но и к снижению степени структурного разупорядочения. При этом изменение фазового состава керамик за счет вытеснения фазы $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$ и формирования фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к изменению тренда изменений $\Phi_{\text{фазовый состав}}$, как в случае времени выдержки, так и при изменении температуры испытаний. Следует также отметить, что изменение температуры с 500 до 700–800 °С приводит не только к снижению величины $\Phi_{\text{фазовый состав}}$, но и к ускорению процессов деградации за более меньшее время выдержки, что свидетельствует о прямой зависимости скорости деградации от температурных факторов, влияющих на тепловое расширение кристаллической структуры.

На рисунке 3 представлены результаты оценки изменения величины удельной мощности в зависимости от условий высокотемпературных испытаний для исследуемых керамик, отражающие кинетику изменения стабильности работоспособности керамик в качестве катодных материалов в результате фазовой деградации.

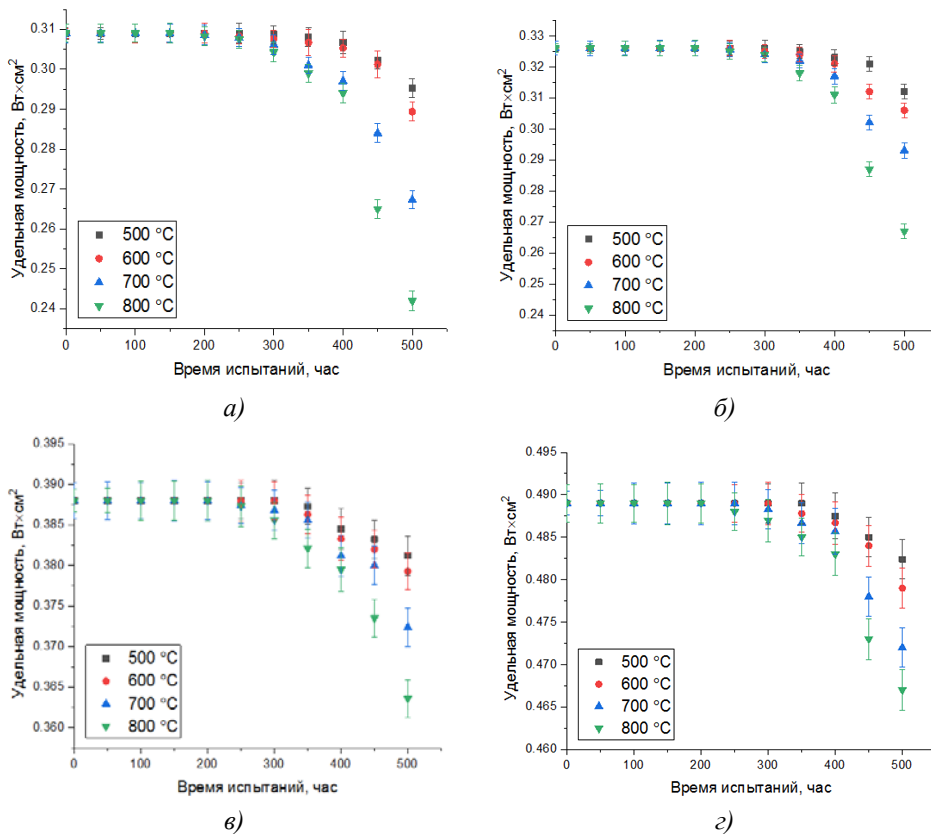


Рис. 3. Результаты оценки изменений величины удельной мощности для исследуемых керамик, полученных с различным содержанием $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ в составе: а) 0,1 М; б) 0,15 М; в) 0,20 М; г) 0,25 М

Результаты изменений величины удельной мощности отражают прямую взаимосвязь между временем и температурой испытаний на высокотемпературную коррозию и стабильность электрохимических характеристик керамик. При этом формирование в составе керамик примесных включений в виде оксидных фаз железа приводит к дестабилизации электрохимических параметров и падению удельной мощности, изменение которой свидетельствует о деградации электродного материала ТОТЭ и снижении энергоэффективности его использования. При этом следует отметить, что наличие в составе керамик фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ при больших концентрациях $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ приводит к увеличению стабильности керамик к внешним воздействиям и процессам окисления, что, в свою очередь, приводит к сохранению работоспособности электродных материалов в течение длительного времени при высоких температурах.

На рисунке 4 представлены результаты оценки изменения значений твердости для исследуемых керамик в ходе испытаний на высокотемпературную деградацию при изменении времени и температуры испытаний, отражающие эффекты разупрочнения керамик, связанного с процессами окисления.

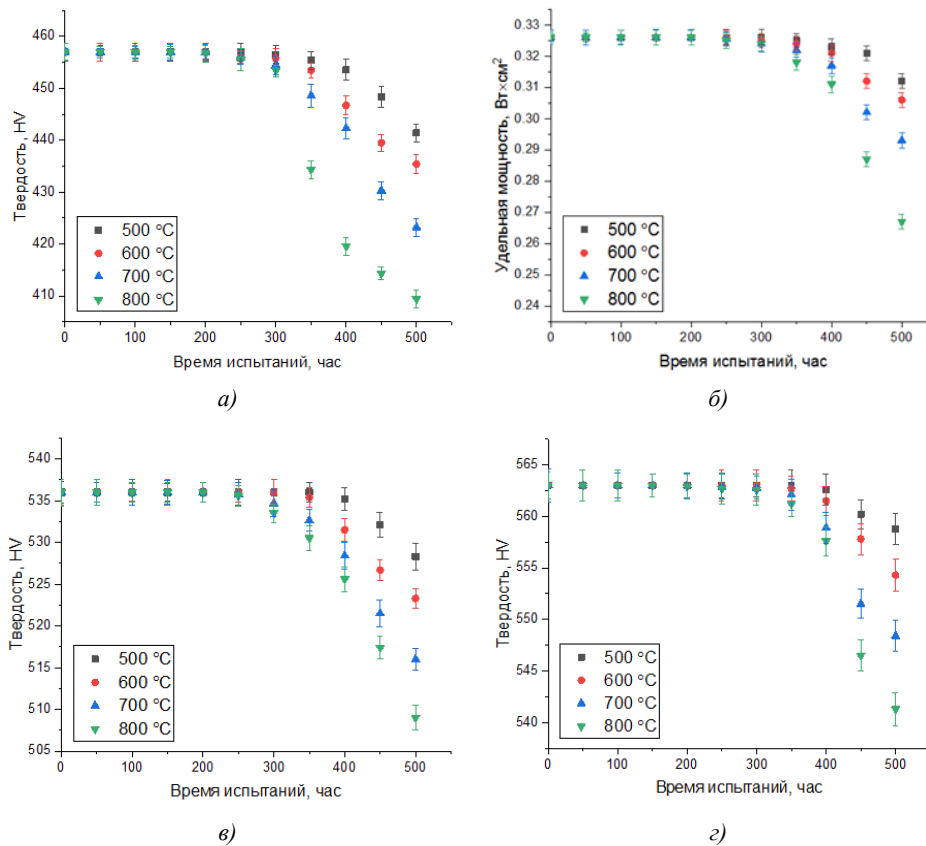


Рис. 4. Результаты оценки изменений твердости образцов исследуемых керамик, полученных с различным содержанием $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ в составе:
а) 0,1 М; б) 0,15 М; в) 0,20 М; з) 0,25 М

Общий вид тенденции изменения значений твердости для исследуемых керамик в зависимости от времени нахождения и температуры испытаний свидетельствует о накопительном эффекте разупрочнения, который проявляется в виде снижения твердости после 200–300 часов испытаний. При этом следует отметить, что, как и в случае структурных изменений, связанных с фазовым составом керамик, изменение твердости имеет явно выраженную температурную зависимость деградации прочностных свойств (уменьшение твердости), которая также имеет прямую взаимосвязь с изменениями фазового состава как в случае исходных керамик при вариации концентрации $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ в составе, так и при высокотемпературной деградации. При этом следует отметить, что в отличие от изменений структурных параметров керамик в зависимости от условий высокотемпературного воздействия, величина разупрочнения менее выражена как во временных промежутках испытаний, так и при увеличении температуры воздействия, из чего можно сделать вывод о том, что процессы окисления оказывают существенное влияние на электрохимические параметры и изменение фазового состава и в меньшей мере влияют на эффекты разупрочнения керамик в ходе ресурсных испытаний.

Выводы

В ходе проведенных исследований были получены следующие ключевые результаты, отражающие характерные изменения, связанные с изучением влияния фазового состава керамик на устойчивость к высокотемпературной деградации.

1. Согласно представленным данным изменения фазового состава керамик в зависимости от изменения концентрации лантана, была установлена динамика фазовых трансформаций, которую можно записать следующим образом: $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4/\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8 \rightarrow (\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4/\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8/\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5 \rightarrow (\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4/\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$.

2. Оценка изменения фактора $\Phi_{\text{фазовый состав}}$, отражающего устойчивость керамик к окислению и деградации, показала, что формирование в составе керамик фазы $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к увеличению стабильности к внешним воздействиям, связанным с формированием оксидных включений, а сам эффект увеличения устойчивости обусловлен наличием межфазных границ, а также более высокими показателями прочности данной фазы к деградации.

3. Оценка изменений электрохимических характеристик показала, что разложение фазы $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4$ на оксидные включения приводит к снижению величины удельной мощности, изменение которой наиболее выражено при высокотемпературном воздействии. При этом формирование керамик с фазой $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к увеличению устойчивости деградации электрохимических характеристик при высокотемпературном воздействии, что свидетельствует о положительном влиянии данной фазы на сопротивляе-

мость к коррозии и ведет к сохранению стабильности работоспособности керамик при использовании их в качестве электродных материалов.

4. Согласно данным изменения твердости, связанной с эффектами разупрочнения, было установлено, что формирование двухфазных керамик $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4/\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ приводит к увеличению сопротивляемости к высокотемпературной деградации, связанной с окислительными процессами, которая выражается в сохранении стабильности прочностных характеристик при длительном высокотемпературном воздействии. При этом максимальное снижение твердости составляет не более 4–5 % для керамик $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})\text{FeO}_4/\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, в то время как наличие в составе фазы $\text{LaSr}_2\text{Fe}_3\text{O}_8$, разложение которой способствует образованию оксидных включений, приводит к деградации прочностных свойств порядка 8–10 %.

Список источников

1. Jose, J. K. Multiferroics for Spintronic Applications / J. K. Jose, R. Balakrishnan. – DOI 10.1002/9783527824229.ch10. – Direct text // Nanotechnology in Electronics : Materials, Properties, Devices. – 2023. – P. 301–316.
2. Study of the crystal structure, thermal stability and conductivity of Sr $(\text{V}_{0,5}\text{Mo}_{0,5})\text{O}_{3+\delta}$ as SOFC material / A. Aguadero, C. De La Calle, D. Pérez-Coll, J. A. Alonso. – DOI 10.1002/fuce.201000070. – Direct text // Fuel Cells. – 2011. – Vol. 11, Issue 1. – P. 44–50.
3. Weber, A. Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications / A. Weber, E. Ivers-Tiffée. – DOI 10.1016/j.jpowsour.2003.09.024. – Direct text // Journal of power sources. – 2004. – Vol. 127, Issue 1–2. – P. 273–283.
4. Das, T. Polaron size and shape effects on oxygen vacancy interactions in lanthanum strontium ferrite / T. Das, J. D. Nicholas, Y. Qi. – Text : electronic // Journal of Materials Chemistry A. – 2017. – Vol. 5, Issue 47. – URL: <https://doi.org/10.1039/c7ta06948k>.
5. Phase formation and magnetic properties of M-type lanthanum substituted strontium ferrites / C. Qin, R. Liu, Y. Sun [et al.]. – Text : electronic // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, Issue 19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.171>.
6. Exsolution of Fe and SrO Nanorods and Nanoparticles from Lanthanum Strontium Ferrite $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{FeO}_{3-\delta}$ Materials by Hydrogen Reduction / T. Ramona, G. Martin, H. Marc [et al.]. – Text : electronic // The Journal of Physical Chemistry C. – 2015. – Vol. 119, Issue 38. – URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b06014>
7. Das, T. Composition, crystallography, and oxygen vacancy ordering impacts on the oxygen ion conductivity of lanthanum strontium ferrite / T. Das, J. D. Nicholas, Y. Qi. – Text : electronic // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2020. – Vol. 22, Issue 17. – URL: <https://doi.org/10.1039/d0cp00206b>.
8. Chavan, S. V. Preparation, properties, and reactivity of lanthanum strontium ferrite as an intermediate temperature SOFC cathode / S. V. Chavan, R. N. Singh. – Text : electronic // Journal of Materials Science. – 2013. – Vol. 48. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7456-9>.

9. Synthesis and electrical properties of strontium-doped lanthanum ferrite with perovskite-type structure / J. A. E. Paiva, P. C. C. Daza, F. A. Rodrigues [et al.]. – Text : electronic // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, Issue 11. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.212>.
10. Lanthanum strontium cobaltite-infiltrated lanthanum strontium cobalt ferrite cathodes fabricated by inkjet printing for high-performance solid oxide fuel cells / M. Kim, D. H. Kim, G. D. Han [et al.]. – Text : electronic // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 843. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155806>.
11. Gross, M. D. A study of thermal stability and methane tolerance of Cu-based SOFC anodes with electrodeposited Co / M. D. Gross, J. M. Vohs, R. J. Gorte. – Text : electronic // *Electrochimica Acta*. – 2007. – Vol. 52, Issue 5. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.08.005>.
12. Application of a negative thermal expansion oxide in SOFC cathode / F. Lu, M. Yang, Y. Shi [et al.]. – DOI 10.1016/j.ceramint.2020.08.225. – Direct text // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, Issue 1. – P. 1095–1100.
13. Thermal stability and oxidation resistance of TiCrAlYO coatings on SS430 for solid oxide fuel cell interconnect applications / H. Chen, J. A. Lucas, W. Priyantha [et al.]. – Text : electronic // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202, Issue 19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.059>.
14. Garai, M. Mica (KMg₃AlSi₃O₁₀F₂) based glass-ceramic composite sealant with thermal stability for SOFC application / M. Garai, S. P. Singh, B. Karmakar. – Text : electronic // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46, Issue 45. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.252>.
15. Properties of Perovskite-like Lanthanum Strontium Ferrite Ceramics with Variation in Lanthanum Concentration / D. B. Borgekov, A. L. Kozlovskiy, R. I. Shakirzyanov [et al.]. – Text : electronic // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12, Issue 12. – URL: <https://doi.org/10.3390/cryst12121792>.

References

1. Jose, J. K., & Balakrishnan, R. (2023). Multiferroics for Spintronic Applications. *Nanotechnology in Electronics: Materials, Properties, Devices*, pp. 301-316. (In English). DOI: 10.1002/9783527824229.ch10
2. Aguadero, A., De La Calle, C., Pérez-Coll, D., & Alonso, J. A. (2011). Study of the crystal structure, thermal stability and conductivity of Sr ((V_{0.5}Mo_{0.5}) O_{3+δ}) as SOFC material. *Fuel Cells*, 11(1), pp. 44-50. (In English). DOI: 10.1002/fuce.201000070
3. Weber, A., & Ivers-Tiffée, E. (2004). Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications. *Journal of power sources*, 127(1-2), pp. 273-283. (In English). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.024
4. Das, T., Nicholas, J. D., & Qi, Y. (2017). Polaron size and shape effects on oxygen vacancy interactions in lanthanum strontium ferrite. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(47). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1039/c7ta06948k>
5. Qin, C., Liu, R., Sun, Y., Wu, J., Zhao, T., & Gong, H. (2023). Phase formation and magnetic properties of M-type lanthanum substituted strontium ferrites. *Ceramics International*, 49(19). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.171>

6. Ramona, T., Martin, G., Marc, H., Bernhard, K., & Simon, P. (2015). Exsolution of Fe and SrO Nanorods and Nanoparticles from Lanthanum Strontium Ferrite $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_{3-\delta}$ Materials by Hydrogen Reduction. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(38). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b06014>.
7. Das, T., Nicholas, J. D., & Qi, Y. (2020). Composition, crystallography, and oxygen vacancy ordering impacts on the oxygen ion conductivity of lanthanum strontium ferrite. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(17). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1039/d0cp00206b>
8. Chavan, S. V., & Singh, R. N. (2013). Preparation, properties, and reactivity of lanthanum strontium ferrite as an intermediate temperature SOFC cathode. *Journal of Materials Science*, 48. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7456-9>
9. Paiva, J. A. E., Daza, P. C. C., Rodrigues, F. A., Ortiz-Mosquera, J. F., da Silva, C. R. M., Munoz, M. M., & Meneses, R. A. M. (2020). Synthesis and electrical properties of strontium-doped lanthanum ferrite with perovskite-type structure. *Ceramics International*, 46(11). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.212>
10. Kim, M., Kim, D. H., Han, G. D., Choi, H. J., Choi, H. R., & Shim, J. H. (2020). Lanthanum strontium cobaltite-infiltrated lanthanum strontium cobalt ferrite cathodes fabricated by inkjet printing for high-performance solid oxide fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 843. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155806>
11. Gross, M. D., Vohs, J. M., & Gorte, R. J. (2007). A study of thermal stability and methane tolerance of Cu-based SOFC anodes with electrodeposited Co. *Electrochimica Acta*, 52(5). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.08.005>
12. Lu, F., Yang, M., Shi, Y., Wu, C., Jia, X., He, H.,... Cai, B. (2021). Application of a negative thermal expansion oxide in SOFC cathode. *Ceramics International*, 47(1), pp. 1095-1100. (In English). DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.225
13. Chen, H., Lucas, J. A., Priyantha, W., Kopczyk, M., Smith, R. J., Lund, K.,... Nachimuthu, P. (2008). Thermal stability and oxidation resistance of TiCrAlYO coatings on SS430 for solid oxide fuel cell interconnect applications. *Surface and Coatings Technology*, 202(19). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.059>
14. Garai, M., Singh, S. P., & Karmakar, B. (2021). Mica ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{F}_2$) based glass-ceramic composite sealant with thermal stability for SOFC application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.252>
15. Borgekov, D. B., Kozlovskiy, A. L., Shakirzyanov, R. I., Zhumazhanova, A. T., Zdorovets, M. V., & Shlimas, D. I. (2022). Properties of Perovskite-like Lanthanum Strontium Ferrite Ceramics with Variation in Lanthanum Concentration. *Crystals*, 12(12). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/cryst12121792>

Информация об авторах / Information about the authors

Боргеков Дарын Боранбаевич, Дарын В. Бorgekov, PhD, Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan
PhD, научный сотрудник, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан

Калиекперова Камила Бахытжановна, PhD докторант, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан

Козловский Артем Леонидович, PhD, преподаватель-исследователь, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана; Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан, Kozlovskiy.a@inp.kz

Молдабаева Гульназ Жаксылыковна, доктор технических наук, профессор кафедры нефтяной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Kamila B. Kaliyekperova, PhD Doctoral Student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan

Artem L. Kozlovskiy, PhD, Teacher-Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana; Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, the Republic of Kazakhstan, Kozlovskiy.a@inp.kz

Gulnaz Zh. Moldabayeva, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 03.06.2024.

The article was submitted 28.05.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 03.06.2024.