

Электрохимическая энергетика. 2025. Т. 25, № 4. С. 209–213

Electrochemical Energetics, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 209–213

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-4-209-213>, EDN: VHFVVB

Научная статья

УДК 620.22

КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛИ ДЛЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. Д. Устюжанинов¹, Д. Ю. Дубовцев¹, А. И. Вепрева¹, А. В. Пугачева²,
Н. С. Саетова^{1✉}, А. В. Кузьмин^{1,3✉}

¹Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

Россия, 142432, г. Черноголовка, пр-т академика Семенова, д. 1

³Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН

Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 18

Устюжанинов Иван Дмитриевич, магистрант, ivanustya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0069-8599>

Дубовцев Дмитрий Юрьевич, инженер-лаборант, d.dubovtzev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4130-7792>

Вепрева Алена Игоревна, инженер-лаборант, a.vepreva98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9282-1820>

Пугачева Анастасия Владимировна, инженер, аспирант, pugacheva.av@icp.ac.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5598-0093>

Саетова Наиля Саетовна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, n.saetova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0721-3944>

Кузьмин Антон Валериевич, кандидат химических наук, доцент, ¹заведующий кафедрой технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ³старший научный сотрудник, a.v.kuzmin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0700-662X>

Аннотация. Методом горячего шликерного литья были получены детали из алюмомагнезиальной шпинели для керамической газовой системы для применения в высокотемпературных трубчатых твердооксидных топливных элементах. Проверена возможность герметизации разработанной системы с использованием стеклогерметиков и осуществлена сборка трубчатого твердооксидного топливного элемента с газовым узлом из керамических деталей.

Ключевые слова: керамические газовые системы, высокотемпературный твердооксидный топливный элемент, горячее шликерное литье, алюмомагнезиальная шпинель, стеклогерметик

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-30051-П (<https://rscf.ru/project/21-79-30051/>).

Для цитирования: Устюжанинов И. Д., Дубовцев Д. Ю., Вепрева А. И., Пугачева А. В., Саетова Н. С., Кузьмин А. В. Керамика на основе алюмомагнезиальной шпинели для твердооксидных топливных элементов // Электрохимическая энергетика. 2025. Т. 25, № 4. С. 209–213. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-4-209-213>, EDN: VHFVVB

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Ceramics based on magnesium-aluminate spinel for solid oxide fuel cells

I. D. Ustyuzhaninov¹, D. Yu. Dubovtsev¹, A. I. Vepreva¹, A. V. Pugacheva²,
N. S. Saetova^{1✉}, A. V. Kuzmin^{1,2✉}

¹Vyatka State University

36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS

1 Academician Semenov Ave., Chernogolovka 142432, Russia

³*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
18 Kutateladze St., Novosibirsk 630090, Russia*

Ivan D. Ustyuzhaniov, ivanustya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0069-8599>

Dmitry Yu. Dubovtsev, d.dubovtzev@yandex.ru, <https://orcid.org/0002-4130-7792>

Alyona I. Vepreva, a.vepreva98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9282-1820>

Anastasiya V. Pugacheva, pugacheva.av@icp.ac.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5598-0093>

Nailya S. Saetova, n.saetova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0721-3944>

Anton V. Kuzmin, a.v.kuzmin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0700-662X>

Abstract. Hot slip casting was applied to produce parts from magnesium-aluminate spinel for the ceramic gas flow distribution system for tubular solid oxide fuel cells. The developed system was sealed using glass sealants. The tubular oxide fuel cells was assembled using a gas unit made by hot slip casting.

Keywords: ceramic gas flow distribution systems, solid oxide fuel cells, hot slip casting, magnesium-aluminate spinel, glass sealant

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 21-79-30051-P (<https://rscf.ru/project/21-79-30051/>).

For citation: Ustyuzhaninov I. D., Dubovtsev D. Yu., Vepreva A. I., Pugacheva A. V., Saetova N. S., Kuzmin A. V. Ceramics based on magnesium-aluminate spinel for solid oxide fuel cells. *Electrochemical Energetics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 209–213 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2025-25-4-209-213>, EDN: VHFVWB

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве конструкций трубчатых твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) применяются системы для распределения газовых потоков, которые, как правило, изготавливают из коррозионностойких нержавеющей сталей [1]. Ключевым недостатком в применении стальных газовых систем является миграция хрома из стали, что может привести к отравлению катода и снижению рабочих характеристик всей установки [2]. Также в результате воздействия топлива, в качестве которого применяется водород, со сталью происходит водородное охрупчивание стали, в связи с чем необходима дополнительная защита стальных деталей [3]. Альтернативой могут служить системы, выполненные из керамических деталей на основе алюмомагнезиальной шпинели (MgAl_2O_4) [4]. Такая шпинель обладает рядом преимуществ, таких как хорошая стабильность в окислительных и восстановительных средах, что позволяет работать при температурах до 1500°C без деградации, и инертность к агрессивным газовым средам. Для улучшения механических свойств и регулировки величины термиче-

ского коэффициента линейного расширения были получены композиты $\text{MgAl}_2\text{O}_4 : \text{MgO}$ с соотношением 3 : 2, а для достижения газоплотности в качестве спекающей добавки был введён оксид кобальта (0.5 мас.%).

Для формирования деталей из MgAl_2O_4 были применены методы прессования и горячего шликерного литья [5]. Поскольку в большинстве конструкций трубчатых ТОТЭ для соединения элементов применяют стеклогерметики [6], в данной работе все детали газовой системы также соединяли с помощью стеклогерметиков. Поскольку от такого соединения зависит надежность и эффективности всей установки, были проведены исследования соединения керамики со стеклогерметиком. Проведена сборка трубчатого ТОТЭ с использованием керамической газовой системы.

МЕТОДЫ

Для получения изделий методом горячего шликерного литья (ГШЛ) на установке «ЭКОН-УГШЛ» (НПП АО «ЭКОН», Россия) с последующим высокотемпературным спеканием [5] был изготовлен шликер

из композита $MgAl_2O_4+MgO$ с использованием термопластичного связующего в количестве 30% от общей массы композита. Полученный шликер отливали в силиконовую мастер-форму, после чего образец подвергали вакуумированию для удаления пузырей. Предварительный отжиг с целью удаления связующего проводили в муфельной печи SNOL 6 7/1300-VP (АВ «UMEGA», Литва). После отжига проводили спекание в высокотемпературной печи при температуре 1600°C в течение 3 ч.

Для формирования керамической газовой системы детали соединяли между собой с помощью стеклогерметиков. Оценка качества полученного соединения осуществлялась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе JSM-6510 (JEOL Ltd., Япония) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE). Для оценки протекания взаимодействия между стеклогерметиком и сочленяемыми материалами были получены карты распределения элементов на границе керамика| стеклогерметик| керамика.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена фотография спечённых изделий, изготовленных с помощью горячего шликерного литья.

Для формирования газовой системы полученные детали соединялись с использованием стеклогерметика, состава $55.8BaO-28.1SiO_2-1.7Al_2O_3-4.4MgO-10B_2O_3$ (мас.%). На рис. 2 представлены фотография сборки единичного трубчатого ТОТЭ с керамическим газовым узлом, микрофотография и карты распределения элементов на границе керамика| стеклогерметик| керамика после герметизации.

На представленной микрофотографии соединения видна хорошая адгезия между стеклом и керамическими деталями. На границах раздела отсутствуют трещины и большие поры. Помимо этого, из карт распределения элементов видно, что на границах раздела отсутствует взаимодействие между

герметиком и керамикой после обработки по режиму герметизации.

По результатам исследований, проведённых на интерконнекторах с одним поса-



Рис. 1. Изделия, изготовленные методом горячего шликерного литья (цвет онлайн)

Fig. 1. Products made by hot slip casting (color online)

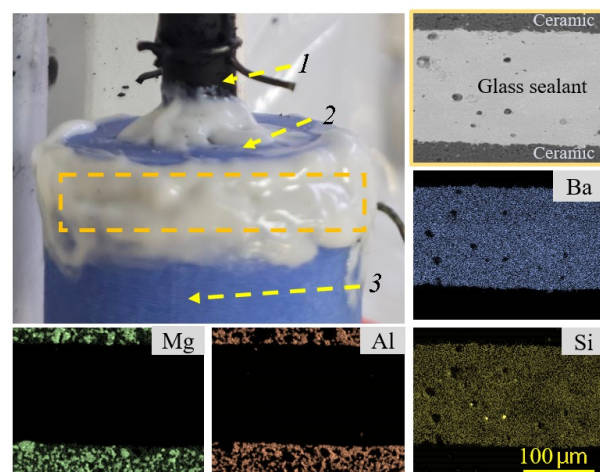


Рис. 2. Фотография сборки трубчатого ТОТЭ с керамическим газовым узлом (1 – трубчатый ТОТЭ, 2 – керамический интерконнектор, 3 – керамический газовый коллектор) и микрофотография соединения керамика| стеклогерметик| керамика и карты распределения элементов (цвет онлайн)

Fig. 2. Assembling of a tubular SOFC with a ceramic gas flow distribution system (1 – tubular SOFC, 2 – ceramic interconnect, 3 – ceramic gas collector) and SEM image of ceramic| glass sealant| ceramic joint and the element distribution maps (color online)

дочным местом, был разработан опытный образец трубчатого ТОТЭ с керамической газовой системой (рис. 3) и схема электрической коммутации единичных ТОТЭ, соеди-

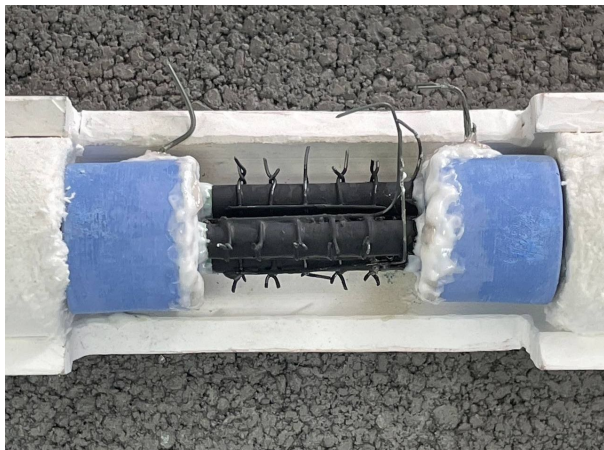


Рис. 3. Сборка трубчатого ТОТЭ с керамической газовой системой (цвет онлайн)

Fig. 3. Assembling of a tubular SOFC with a ceramic gas flow distribution system (color online)

нённых керамической трубной доской. Для соединения деталей был использован стеклогерметик системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O-Y}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-B}_2\text{O}_3$ [7].

Сборка ТОТЭ с керамической газовой системой показала надёжное и герметичное соединение как между керамическими деталями газовой системе, так и между функциональными элементами ТОТЭ и керамикой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе настоящей работы был проведен синтез и формирование керамических деталей методом горячего шликерного литья. Исследована химическая стабильность соединения полученных деталей со стеклогерметиком. Проведена сборка трубчатого ТОТЭ с керамической газовой системой. В дальнейшей работе планируется проведение исследований такой сборки в условиях работы ТОТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липилин А. С. ТОТЭ и энергосистемы на их основе: состояние и перспективы // *Электрохимическая энергетика*. 2007. Т. 7, № 2. С. 61–72. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2007-7-2-61-72>
2. Ogasawara K., Kameda H., Matsuzaki Y., Sakurai T., Uehara T., Toji A., Sakai N., Yamaji K., Horita T., Yookokawa H. Chemical Stability of Ferritic Alloy Interconnect for SOFCs // *J. Electrochem. Soc.* 2007. Vol. 154, № 7. P. B657. <https://doi.org/10.1149/1.2735919>
3. Fu Q., Li Z., Wey W., Liu F., Xu X., Liu Z. Performance enhancement of a beam and slot interconnector for anode-supported SOFC stack // *Energy Convers. Manag.* Elsevier Ltd. 2021. Vol. 241. Art. 114277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114277>
4. Nielsen K. A., Solvang M., Nielsen S. B. L., Dinesen A. R., Beeaff D., Larsen P. H. Glass composite seals for SOFC application // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007.

Vol. 27, № 2–3. P. 1817–1822. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.046>

5. Udomsilp D., Roehrens D., Menzler N. H., Conradt R., Guillon O. Characterization of the Contact Resistance of Cathodic SOFC Contacting // *ECS Trans.* The Electrochemical Society. 2015. Vol. 68, № 1. P. 751–756. <https://doi.org/10.1149/06801.0751ecst>

6. Tolstobrov I. V. Shirokova E. S., Vepreva A. I., Dubovtsev D. Yu., Chetvertnykh Yu. A., Kuzmin A. V., Saetova N. S. Fused deposition modeling of glass sealants: A new approach to SOFC sealing // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd. 2024. Vol. 50, № 11. P. 19561–19570 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.068>

7. Saetova N. S. Krainova D. A., Kuzmin A. V., Raskovalov A. A., Zharkina S. T., Porotnikova N. M., Farlenkov A. S., Moskalenko N. I., Ananyev M. V., Dyadenko M. V., Ghosh S. Alumina-silica glass-ceramic sealants for tubular solid oxide fuel cells // *J. Mater. Sci.* Springer US. 2019. Vol. 54, № 6. P. 4532–4545. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3181-8>

REFERENCES

1. Lipilin A. S. SOFCs and energy systems based on them: State and prospects. *Electrochemical Energetics*, 2007, vol. 7, no. 2, pp. 61–72. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2007-7-2-61-72> (in Russian).
2. Ogasawara K., Kameda H., Matsuzaki Y., Sakurai T., Uehara T., Toji A., Sakai N., Yamaji K.,

Horita T., Yookokawa H. Chemical Stability of Ferritic Alloy Interconnect for SOFCs. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, vol. 154, no. 7, pp. B657. <https://doi.org/10.1149/1.2735919>

3. Fu Q., Li Z., Wey W., Liu F., Xu X., Liu Z. Performance enhancement of a beam and slot intercon-

nector for anode-supported SOFC stack. *Energy Convers. Manag. Elsevier Ltd.*, 2021, vol. 241, art. 114277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114277>

4. Nielsen K. A., Solvang M., Nielsen S. B. L., Dinesen A. R., Beeaff D., Larsen P. H. Glass composite seals for SOFC application. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007, vol. 27, no. 2–3, pp. 1817–1822. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.046>

5. Udomsilp D., Roehrens D., Menzler N. H., Conradt R., Guillon O. Characterization of the Contact Resistance of Cathodic SOFC Contacting. *ECS Trans. The Electrochemical Society*, 2015, vol. 68, no. 1, pp. 751–756. <https://doi.org/10.1149/06801.0751ecst>

6. Tolstobrov I. V., Shirokova E. S., Vepreva A. I., Dubovtsev D. Yu., Chetvertnykh Yu. A., Kuzmin A. V., Saetova N. S. Fused deposition modeling of glass sealants: A new approach to SOFC sealing. *Ceram. Int. Elsevier Ltd.*, 2024, vol. 50, no. 11, pp. 19561–19570 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.068>

7. Saetova N. S., Krainova D. A., Kuzmin A. V., Raskovalov A. A., Zharkina S. T., Porotnikova N. M., Farlenkov A. S., Moskalenko N. I., Ananyev M. V., Dyadenko M. V., Ghosh S. Alumina–silica glass–ceramic sealants for tubular solid oxide fuel cells. *J. Mater. Sci. Springer US*, 2019, vol. 54, no. 6, pp. 4532–4545. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3181-8>

Поступила в редакцию 15.10.2025; одобрена после рецензирования 22.10.2025; принята к публикации 17.11.2025; опубликована 25.12.2025
The article was submitted 15.10.2025; approved after reviewing 22.10.2025; accepted for publication 17.11.2025; published 25.12.2025