УДК 536.21;546.831.4;546.64;544.344.01
DOI: 10.7868/S3034558826090087

Оригинальная статья

Влияние температурной обработки на теплопроводность монокристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия

Д.А. Агарков[1, 5], М.А. Борик[2], Е.В. Ежикова[2], Д.С. Катрич[1], А.В. Кулебякин[2], Е.Е. Ломонова[2], Ф.О. Милович[3], В.А. Мызина[2], П.А. Попов[4, *], А.А. Рею[2], Н.Ю. Табачкова[2, 3], С.А. Федуков[4]

[1]Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, ул. Академика Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл.,142432 Российская Федерация
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Российская Федерация
[3]Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", Ленинский пр., 4/1, Москва, 119049 Российская Федерация
[4]Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, ул. Бежицкая, 14, Брянск, 241036 Российская Федерация
[5]Московский физико-технический институт (МФТИ), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Российская Федерация
**e-mail: tfbgubry@mail.ru*

Аннотация. Исследовано влияние термообработки на воздухе при 1000°C в течение 400 ч на величину теплопроводности кристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия, в диапазоне концентраций от 2.8 до 30 мол.%. Для кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония с содержанием 2.8 и 3.7 мол.% Y_2O_3 теплопроводность после термообработки понижается в диапазоне температур 50–200 K, что связано с появлением дополнительно моноклинной фазы, способствующей усилению фононного рассеяния. Термообработка практически не сказывается на теплопроводности образцов с содержанием Y_2O_3 от 10 до 15 мол.%. Отмечено небольшое повышение теплопроводности после термообработки кристаллов, содержащих 20–30 мол.% оксида иттрия, обусловленное упорядочением кислородных вакансий.

Ключевые слова: диоксид циркония, монокристаллы, отжиг, теплопроводность, изменения микроструктуры

Финансирование. Исследования структуры кристаллов методом комбинационного рассеяния света выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 17-79-30071.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена на оборудовании Центров коллективного пользования НИТУ МИСИС и Брянского государственного университета.

Ссылка для цитирования: Агарков Д.А., Борик М.А., Ежикова Е.В., Катрич Д.С., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Попов П.А., Рею А.А., Табачкова Н.Ю., Федуков С.А. Влияние температурной обработки на теплопроводность монокристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия // Неорганические материалы / Inorganic Materials. 2026. Т. 62. № 9. С. 1137–1146. https://doi.org/10.7868/S3034558826090087

© Агарков Д.А., Борик М.А., Ежикова Е.В., Катрич Д.С., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Попов П.А., Рею А.А., Табачкова Н.Ю., Федуков С.А., 2026

DOI: 10.7868/S3034558826090087 Original Article

Effect of Thermal Treatment on the Thermal Conductivity of Yttria-Stabilized ZrO_2 Single Crystals

D.A. Agarkov[1, 5], M.A. Borik[2], E.V. Ezhikova[2], D.S. Katrich[1], A.V. Kulebyakin[2], E.E. Lomonova[2], F.O. Milovich[3], V.A. Myzina[2], P.A. Popov[4, *], A.A. Reu[2], N.Yu. Tabachkova[2, 3], S.A. Fedukov[4]

[1]Institute of Solid State Physics named after Yu.A. Osipyan, Russian Academy of Sciences, Academician Osipyana St., 2, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russian Federation
[2]Institute of General Physics named after A.M. Prokhorov, Russian Academy of Sciences, Vavilova St., 38, Moscow, 119991 Russian Federation
[3]National University of Science and Technology "MISIS", Leninsky Prospekt, 4/1, Moscow, 119049 Russian Federation
[4]Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky, Bezhitskaya St., 14, Bryansk, 241036 Russian Federation
[5]Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Institutsky Lane, 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russian Federation
**e-mail: tfbgubry@mail.ru*

Abstract. The effect of heat treatment in air at 1000°C for 400 h on the thermal conductivity of ZrO_2 single crystals stabilized with yttria over the concentration range of 2.8–30 mol% was investigated. For partially stabilized zirconia crystals containing 2.8 and 3.7 mol% Y_2O_3, the thermal conductivity decreases after heat treatment in the temperature range of 50–200 K, which is associated with the formation of an additional monoclinic phase that enhances phonon scattering. Heat treatment has virtually no effect on the thermal conductivity of samples with a Y_2O_3 content of 10–15 mol%. A slight increase in thermal conductivity after heat treatment was observed for crystals containing 20–30 mol% yttria, which is attributed to the ordering of oxygen vacancies.

Keywords: zirconium dioxide, single crystals, annealing, thermal conductivity, microstructural changes

Funding. The study of the crystal structure by Raman scattering was supported by the Russian Science Foundation grant 17-79-30071.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. This work was carried out using equipment at the Shared Use Centers of NUST MISIS and Bryansk State University.

For citation. Agarkov D.A., Borik M.A., Ezhikova E.V., Katrich D.S., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Popov P.A., Reu A.A., Tabachkova N.Yu., Fedukov S.A. Effect of Thermal Treatment on the Thermal Conductivity of Yttria-Stabilized ZrO_2 Single Crystals. *Neorganicheskie Materialy / Inorganic Materials*. 2026. V. 62. No. 9. P. 1137–1146. (In Russ.)
https://doi.org/10.7868/S3034558826090087

ВВЕДЕНИЕ

Использование материалов на основе диоксида циркония в современной технике обусловлено их высокими характеристиками электрических, химических, оптических и механических свойств в сочетании с тугоплавкостью (температура плавления ~2800°C), химической и биологической инертностью [1–7]. Прогресс в технологии материалов на основе диоксида циркония, включая технологию исходного сырья, позволяет в настоящее время получать эти материалы в виде керамики с высокой плотностью или повышенной пористостью с порами разных форм и размеров, поли- и монокристаллических пленок, монокристаллов [7–11]. Как правило, эти материалы представляют собой твердые растворы с неупорядоченной анион-дефицитной флюоритовой структурой, образующейся благодаря введению оксидов

© Agarkov D.A., Borik M.A., Ezhikova E.V., Katrich D.S., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Popov P.A., Reu A.A., Tabachkova N.Yu., Fedukov S.A., 2026

с гетеровалентными катионами, таких как оксиды иттрия, скандия, редкоземельных и щелочноземельных элементов. Целью введения стабилизирующих оксидов является исключение фазового тетрагонально-моноклинного перехода, который сопровождается большими объемными изменениями, способными разрушить материал [3]. Структурные характеристики, фазовый состав твердых растворов и их физико-химические свойства зависят как от вида и концентрации введенных стабилизирующих оксидов, так и от метода и режима синтеза материала [12–14].

Для высокотемпературных применений большую важность имеет сохранение функциональных характеристик материала в процессе эксплуатации. Длительная выдержка материалов на основе диоксида циркония при повышенных рабочих температурах может приводить к изменению их функциональных характеристик. Поэтому исследованию влияния термообработки на стабильность структуры, тепло- и электрофизические свойства этих материалов посвящено достаточно много работ [14–23]. Основными причинами деградации характеристик материалов на основе диоксида циркония могут быть распад твердого раствора с образованием новых фаз, упорядочение катионов и кислорода в кристаллической решетке твердого раствора, а для поликристаллических материалов – дополнительные изменения в микроструктуре и химическом составе на границах зерен [14–26]. Наиболее подробно изучена зависимость фазового состава, структуры, тепло- и электрофизических характеристик от химического состава, условий получения и термообработки для твердых растворов ZrO_2–Y_2O_3 (YSZ). Оксид иттрия может стабилизировать тетрагональный и кубический диоксид циркония в более широком диапазоне составов, чем катионы с бóльшим или меньшим ионным радиусом [27–33], что способствует устойчивости их характеристик при повышенных температурах.

Благодаря существованию тетрагональных и кубических твердых растворов ZrO_2–Y_2O_3 в широком диапазоне концентраций возможно введение в них большого спектра дополнительных легирующих примесей при сохранении фазовой устойчивости. В настоящее время появились работы по дополнительному легированию материалов YSZ с целью модифицирования их теплофизических характеристик и повышения стабильности при работе в условиях повышенных температур [34–38].

Исследованию теплопроводности материалов YSZ посвящен ряд работ [15, 39–46], в которых показано, что значения теплопроводности в области температур от комнатной до 1200°C практически не зависят от температуры и обычно не превосходят величины k = 2.5 Вт/(м K). Часть этих работ выполнена на плотной керамике, а часть – на монокристаллах [40–43, 45, 46]. Низкая теплопроводность монокристаллов YSZ и слабость ее температурной зависимости связаны с рассеянием фононов на кислородных вакансиях и катионах введенных примесей, дефектных комплексах, включениях вторых фаз [39–42].

Целью настоящей работы было исследование влияния термообработки на воздухе при T = 1000°C в течение 400 ч на величину теплопроводности кристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия в широком диапазоне концентраций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кристаллы твердых растворов на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$, где x = 0.028–0.30, были выращены направленной кристаллизацией расплава в холодном контейнере [47] и отожжены при температуре 1000°C в течение 400 ч. Отжиг проводили в высокотемпературной печи сопротивления Supertherm HT04/16 на воздухе.

Фазовый состав образцов, вырезанных из монокристаллов после отжига, контролировался с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (**КРС**) при возбуждении лазером с длиной волны 633 нм.

Экспериментальное определение теплопроводности кристаллов после роста и отжига в температурном интервале 50–300 K осуществлялось абсолютным стационарным методом продольного теплового потока. Описание аппаратуры и методики измерений приведено в [48]. Погрешность определения абсолютной величины теплопроводности не превышала ±6%. Образцы в виде параллелепипедов с размерами ~ 7 × 7 × (15–20) мм были вырезаны из кристаллов вдоль оси роста, кристаллографическая ориентация была произвольной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования влияния термообработки на теплопроводность были выбраны наиболее характерные составы кристаллов в разных диапазонах концентрации оксида иттрия, различающиеся фазовым составом, типом дефектов и дефектными комплексами, которые были определены при исследовании локальной структуры в монокристаллах ZrO_2–Y_2O_3 [49]. Составы исследованных кристаллов и используемые обозначения приведены в табл. 1.

Внешний вид кристаллов (рис. 1) после отжига не изменялся.

На рис. 2 приведены спектры КРС кристаллов до и после отжига. Для кристаллов до отжига (2.8–3.7)YSZ спектр КРС имеет вид, характерный для тетрагональной структуры [50, 51] (рис. 2а). После отжига в спектрах КРС (2.8–3.7)YSZ появляются дополнительные линии моноклинной фазы. В спектрах КРС кристаллов (10–20)YSZ (рис. 2б) до и после отжига наблюдается линия в области сдвига комбинационного рассеяния 628 $см^{-1}$, которая соответствует колебанию F_{2g} для кубической структуры [50]. Различие контура спектра КРС кристаллов 30YSZ и (10–20)YSZ после отжига становится очевидным, что связано с большим числом кислородных вакансий при увеличении концентрации Y_2O_3 и их частичным

Таблица 1. Состав исследованных кристаллов $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ и их обозначение
Table 1. Composition of the studied $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ crystals and their designations

Состав		Обозначение
ZrO_2	Y_2O_3	
0.972	0.028	2.8YSZ
0.963	0.037	3.7YSZ
0.90	0.10	10YSZ
0.85	0.15	15YSZ
0.80	0.20	20YSZ
0.70	0.30	30YSZ

(а) (б)

Рис. 1. Внешний вид кристаллов после отжига: а – 2.8YSZ и 3.7YSZ, б – (10–30)YSZ
Fig. 1. Appearance of the crystals after annealing: а – 2.8YSZ and 3.7YSZ, б – (10–30)YSZ

(а) (б)

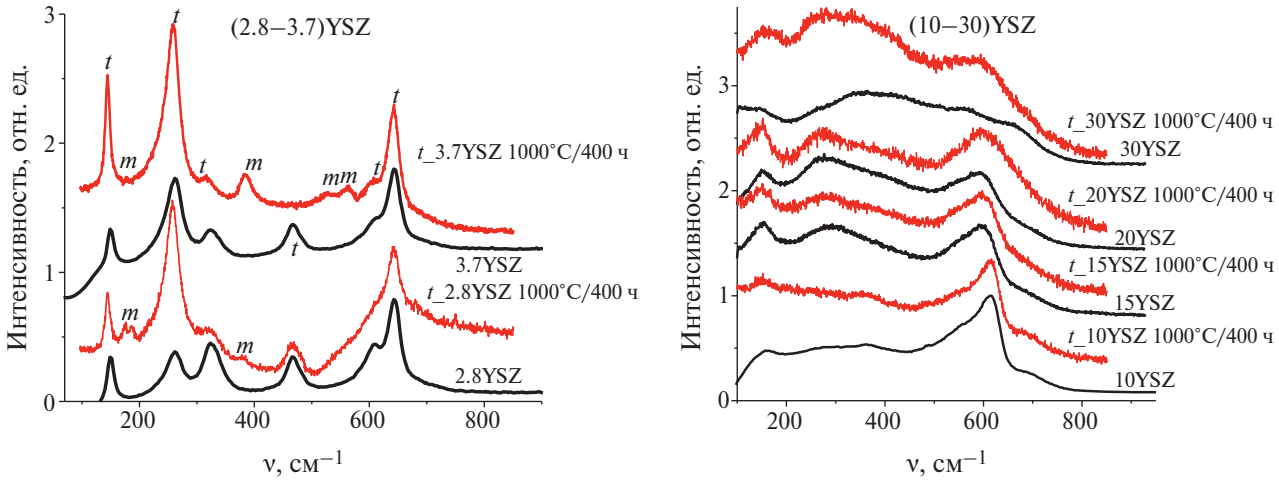

Рис. 2. Спектры КРС до и после термообработки кристаллов: а – (2.8–3.7)YSZ; б – (10–30)YSZ
Fig. 2. Raman spectra of the crystals before and after heat treatment: а – (2.8–3.7)YSZ; б – (10–30)YSZ

упорядочением [49]. Таким образом, при отжиге кристаллов (10–30)YSZ практически не происходит изменений в их фазовом составе, что показывают спектры КРС (рис. 2б).

На рис. 3 представлена температурная зависимость теплопроводности $k(T)$ в диапазоне температур 50–300 K кристаллов YSZ до и после термообработки. В табл. 2 приведены значения теплопроводности для нескольких температур в численном выражении.

Изменения теплопроводности кристаллов после термообработки невелики практически для всех составов (рис. 3, табл. 2). Для кристаллов (2.8–3.7)YSZ теплопроводность немного ниже, чем до отжига при температурах до 100–150 K, что связано с появлением моноклинной фазы, способствующей усилению фононного рассеяния. Как и до отжига, теплопроводность монотонно возрастает с температурой и выходит на низкотемпературное плато при 200–300 K, что характерно для структурно-разупорядоченных сред [40, 42]. Термообработка наиболее слабо сказалась на теплопроводности образцов с содержанием Y_2O_3 от 10 до 15 мол.% (рис. 3). В диапазоне концентраций Y_2O_3 от 10 до 15 мол.% температурная зависимость теплопроводности для отожженных образцов практически совпадает с $k(T)$ кристаллов до отжига, что показывает сохранение значительной

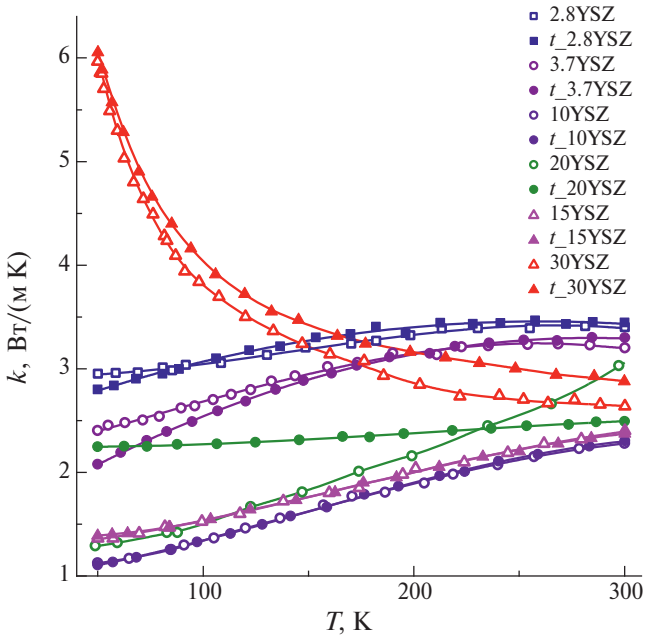

Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности кристаллов 2.8YSZ, 3.7YSZ, 10YSZ, 15YSZ, 20YSZ, 30YSZ до и после термообработки
Fig. 3. Temperature dependences of the thermal conductivity of 2.8YSZ, 3.7YSZ, 10YSZ, 15YSZ, 20YSZ, and 30YSZ crystals before and after heat treatment

степени разупорядоченности структуры твердого раствора после отжига [49] и наиболее низкой величины его теплопроводности (табл. 2).

После отжига существенно уменьшается крутизна зависимости $k(T)$ кристаллов 20YSZ, величина теплопроводности возрастает в интервале температур 50–250 K и снижается при температурах 250–300 K по сравнению с теплопроводностью неотожженных кристаллов. До отжига зависимость $k(T)$ кристаллов 20YSZ имела бóльшую крутизну в сравнении с крутизной $k(T)$ кристаллов (10–15)YSZ, что свидетельствует о процессах упорядочения дефектов в кристаллической решетке с образованием областей с ближним порядком (дефектные комплексы) в образцах 20YSZ [42]. По данным исследования зависимости локальной структуры кристаллов YSZ [49], в кристаллах 20YSZ существенно растет количество дефектных комплексов с участием двух кислородных вакансий, что способствует снижению общего числа дефектных центров и свободных кислородных вакансий, несмотря на увеличение концентрации Y_2O_3. Упорядочение кислородных вакансий при отжиге приводит к повышению теплопроводности кристаллов 20YSZ. Вид зависимости $k(T)$ после отжига носит промежуточный характер между $k(T)$ для кристаллов (10–15)YSZ и (30–40)YSZ.

Отжиг кристаллов 30YSZ приводит к небольшому увеличению теплопроводности практически во всем температурном диапазоне измерений. Теплопроводность кристаллов 30YSZ уменьшается в области температур от 50 до 200 K из-за возрастания интенсивности фононного рассеяния на дефектах структуры. Величина теплопроводности кристаллов 30YSZ до отжига близка к теплопроводности кубических кристаллов с содержанием 10–15 мол.%, но ниже, чем для тетрагональных кристаллов с концентрацией оксида иттрия 2.8–3.7 мол.%. После отжига отмечено небольшое увеличение теплопроводности кристаллов с концентрацией оксида иттрия 30 мол.%. Это, видимо, связано с увеличением степени упорядочения кислородных вакансий при отжиге и снижением общего числа дефектных центров за счет увеличения числа центров с двумя кислородными вакансиями [48].

Таблица 2. Теплопроводность монокристаллов YSZ до и после отжига при температурах 50–300 K с содержанием стабилизирующего оксида иттрия от 2.8 до 30 мол.%
Table 2. Thermal conductivity of YSZ single crystals before and after annealing in the temperature range of 50–300 K with a stabilizing yttria content from 2.8 to 30 mol.%

T, K	Теплопроводность, Вт/(м K)											
	2.8		3.7		10		15		20		30	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
50	2.95	2.79	2.39	2.07	1.12	1.10	1.35	1.39	1.29	2.25	5.97	6.06
100	3.05	3.07	2.68	2.54	1.34	1.34	1.53	1.53	1.5	2.27	3.81	4.03
200	3.33	3.40	3.15	3.14	1.89	1.90	2.00	2.00	2.17	2.38	2.86	3.16
300	3.39	3.43	3.20	3.29	2.28	2.30	2.39	2.37	3.06	2.5	2.64	2.88

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние термообработки на воздухе при 1000°C в течение 400 ч на величину теплопроводности кристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия в диапазоне концентраций от 2.8 до 30 мол.%. Изменения теплопроводности после термообработки невелики практически для всех составов. Для частично стабилизированных кристаллов с содержанием 2.8 и 3.7 мол.% Y_2O_3 теплопроводность после термообработки немного понижается в диапазоне температур 50–200 K, что связано с появлением моноклинной фазы, способствующей усилению фононного рассеяния. На теплопроводность образцов с содержанием Y_2O_3 от 10 до 15 мол.% в интервале температур 50–300 K термообработка не оказала существенного влияния. Небольшое повышение теплопроводности кристаллов (20–30)YSZ после термообработки связано с увеличением степени упорядочения кислородных вакансий при отжиге и снижением общего числа дефектных центров за счет увеличения числа центров с двумя кислородными вакансиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Basu R.N.* Materials for Solid Oxide Fuel Cells. Chapter 12 in Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology / Ed. Basu S. New Delhi: Anamaya, 2006. 286 p.
2. *Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P.* Thermal-Barrier Coatings for More Efficient Gas-Turbine Engines // MRS Bull. 2012. V. 37. P. 891. https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232
3. *Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C.* Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2000. V. 83. No. 3. P. 461–487. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x
4. *Yildirim H., Pachter R.* Extrinsic Dopant Effects on Oxygen Vacancy Formation Energies in ZrO_2 with Implication for Memristive Device Performance // ACS Appl. Electron. Mater. 2019. V. 1. No. 4. P. 467–477. https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00090
5. *Kelly J.R., Denry I.* Stabilized Zirconia as a Structural Ceramic: an Overview // Dent. Mater. 2008. V. 24. P. 289–298. https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.005
6. *Mahato N., Banerjeea A., Gupta A., Omar Sh., Balani K.* Progress in Material Selection for Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Review // Prog. Mater. Sci. 2015. V. 72. P. 141–337. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.001
7. *Nishimura T., Kojima T., Nagashio K., Niwa M.* Ion Conductive Character of Low-Yttria-Content Yttria-Stabilized Zirconia at Low Temperature // Jpn. J. Appl. Phys. 2021. V. 60. No. SB. P. SBBF03. https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6dc
8. *Zhou S., Shen S., Chen Y., Zhang Z., Wu S.* Fast Synthesis of Novel Micron Porous Particles of Gd, Yb and Y-Stabilized Zirconia to Prepare TBCs with Low Thermal Conductivity // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 259. P. 124018. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124018
9. *Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E.* Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique in: Springer Hahdbook of Crystal Growth. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 433 p.
10. *Yuan J., Zhou X., Dong S., Jiang J., Deng L., Song W., Dingwell D.B., Cao X.* Plasma Sprayed 18 mol. % $YO_{1.5}$ Stabilized Hafnia as Potential Thermal Barrier Coating // Ceram. Int. 2021. V. 47. No. 10. P. 14515–14526. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.031
11. *Kim Y., Kim J., Han J.-W., Choi J.* Multiscale Mechanics of Yttria Film Formation During Plasma Spray Coating // Appl. Surface Sci. 2022. V. 572. P. 151416. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151416
12. *Zhang J., Lenser C., Menzler N.H., Guillon O.* Comparison of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Electrolyte Materials for Operation at 500°C // Solid State Ionics. 2020. V. 344. P. 115138. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115138
13. *Rocha R.A., Muccillo E.N.S., Dessemonda L., Djurado E.* Thermal Ageing of Nanostructured Tetragonal Zirconia Ceramics: Characterization of Interfaces // J. Eur. Ceram. Soc. 2010. V. 30. No. 2. P. 227–231. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.05.004
14. *Araki W., Koshikawa T., Yamaji A., Adachi T.* Degradation Mechanism of Scandia-Stabilised Zirconia Electrolytes: Discussion Based on Annealing Effects on Mechanical Strength, Ionic Conductivity, and Raman Spectrum // Solid State Ionics. 2009. V. 180. No. 28–31. P. 1484–1489. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.09.001
15. *Sharma A., Witz G., Howell P.C., Hitchman N.* Interplay of the Phase and the Chemical Composition of the Powder Feedstock on the Properties of Porous 8YSZ Thermal Barrier Coatings // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. V. 41. No. 6. P. 3706–3716. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.062
16. *Kimura Y., Kushi T., Unemoto A., Amezawa K., Kawada T.* Influence of Aging on Mechanical Properties of Yttria-Doped Zirconia // Ceramics. 2018. V. 1. No. 2. P. 287–303. https://doi.org/10.3390/ceramics1020023
17. *Itoh H., Mori M., Idemoto Y., Imai H., Nakayama M.* Annealing Effect on Phase Stability of Doped Zirconia Using Experimental and Computational Studies // Solid State Ionics. 2016. V. 297. P. 20–28. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.09.026
18. *Nomura K., Mizutani Y., Kawai M., Nakamura Y., Yamamoto O.* Aging and Raman Scattering Study of Scandia and Yttria Doped Zirconia // Solid State Ionics. 2000. V. 132. No. 3–4. P. 235–239. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00648-2

19. *Lawson S.* Environmental Degradation of Zirconia Ceramics, Review // J. Eur. Ceram. Soc. 1995. V. 15. P. 485–502. https://doi.org/10.1016/0955-2219(95)00035-S
20. *Pecharrom´an C., Bartolom´e J.F., Requena J., Moya J.S., Deville S., Chevalier J., Fantozzi G., Torrecillas R.* Percolative Mechanism of Aging in Zirconia Containing Ceramics for Medical Applications // Adv. Mater. 2003. V. 15. P. 507. https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08696
21. *Badwal S.P.S.* Stability of Solid Oxide Fuel Cell Components // Solid State Ionics. 2001. V. 143. No. 1. P. 39–46. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(01)00831-1
22. *Araki W., Koshikawa T., Yamaji A., Adachi T.* Degradation Mechanism of Scandia-Stabilised Zirconia Electrolytes: Discussion Based on Annealing Effects on Mechanical Strength, Ionic Conductivity, and Raman Spectrum // Solid State Ionics. 2009. V. 180. No. 28–31. P. 1484–1489. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.09.001
23. *Girolamo G., Blasi C., Schioppa M., Tapfer L.* Structure and Thermal Properties of Heat Treated Plasma Sprayed Ceria–Yttria Co-Stabilized Zirconia Coatings // Ceram. Int. 2010. V. 36. No. 3. P. 961–968. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.10.020
24. *Jones R.L., Reidy R.F., Mess D.* Scandia, Yttria-Stabilized Zirconia for Thermal Barrier Coatings // Surf. Coat. Technol. 1996. V. 82. No. 1–2. P. 70–76. https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02646-0
25. *Liu H., Li S., Li Q., Li Y.* Investigation on the Phase Stability, Sintering and Thermal Conductivity of Sc_2O_3–Y_2O_3–ZrO_2 for Thermal Barrier Coating Application // Mater. Des. 2010. V. 31. P. 2972–2977. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.019
26. *Yashima M., Kakihana M., Yoshimura M.* Metastable-Stable Phase Diagrams in the Zirconia-Containing Systems Utilized in Solid-Oxide Fuel Cell Application // Solid State Ionics. 1996. V. 86–88. No. 2. P. 1131–1149. https://doi.org/10.1016/0167-2738(96)00386-4
27. *Suzuki Y.* Phase Transition Temperature of Fluorite-Type ZrO_2–Y_2O_3 Solid Solutions Containing 8–44 mol. % Y_2O_3 // Solid State Ionics. 1995. V. 81. No. 3–4. P. 211–216. https://doi.org/10.1016/0167-2738(95)00186-A
28. *Gotsch T., Wallisch W., Stoger-Pollach M., Klotzer B., Penner S.* From Zirconia to Yttria: Sampling the YSZ Phase Diagram Using Sputter-Deposited Thin Films // AIP Adv. 2016. V. 6. No. 2. P. 025119. https://doi.org/10.1063/1.4942818
29. *Chen M., Hallstedt B., Gauckler L.J.* Thermodynamic Modeling of the ZrO_2–$YO_{1.5}$ system // Solid State Ionics. 2004. V. 170. No. 3–4. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.02.017
30. *Andrievskaya E.R.* Phase Equilibria in the Refractory Oxide Systems of Zirconia, Hafnia and Yttria with Rare-Earth Oxides // J. Eur. Ceram. Soc. 2008. V. 28. No. 12. P. 2363–2388. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.01.009
31. *Ruh R., Garrett H.J., Domogala R.F., Patel V.A.* The System Zirconia-Scandia // J. Eur. Ceram. Soc. 1977. V. 60. No. 9–10. P. 399–403. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15521.x
32. *Sheu T.-S., Xu J., Tien T.-Y.* Phase Relationships in the ZrO_2–Sc_2O_3 and ZrO_2–In_2O_3 Systems // J. Am. Ceram. Soc. 1993. V. 76. No. 8. P. 2027–2032. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb08328.x
33. *Wen T., Yuan L., Liu T., Sun Q., Jin E., Tian C., Yu J.* Enhanced Ionic Conductivity and Thermal Shock Resistance of MgO Stabilized ZrO_2 Doped with Y_2O_3 // Ceram. Int. 2020. V. 46. No. 12. P. 19835–19842. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.038
34. *Bhandari K., Grover V., Roy A., Bhatt R., Banerjee J., Tyagi A.K.* $(Y_{1-x}Nd_x)_3Zr_5O_{14.5}$ Solid Solutions as Inert Matrices: Phase Evolution, Order-Disorder Dynamics and Thermophysical Behavior // Mater. Today Commun. 2021. V. 27. P. 102158. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102158
35. *Ma W., Gao Y., Zhang J., Bai Y., Jia R., Dong H., Wang R., Bao M.* Phase Composition, Microstructure and Thermophysical Properties of the $Sr_x(Zr_{0.9}Y_{0.05}Yb_{0.05})O_{1.95+x}$ Ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. V. 41. No. 4. P. 2734–2745. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.031
36. *Zhou S., Shen S., Chen Y., Zhang Z., Wu S.* Fast Synthesis of Novel Micron Porous Particles of Gd, Yb and Y-Stabilized Zirconia to Prepare TBCs with Low Thermal Conductivity // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 259. P. 124018. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124018
37. *Chen D., Wang Q., Liu Y., Ning X.* Microstructure, Thermal Characteristics, and Thermal Cycling Behavior of the Ternary Rare Earth Oxides (La_2O_3, Gd_2O_3, and Yb_2O_3) Co-doped YSZ Coatings // Surf. Coat. Technol. 2020. V. 403. P. 126387. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126387
38. *Winter M.R., Clarke D.R.* Thermal Conductivity of Yttria-Stabilized Zirconia–Hafnia Solid Solutions // Acta Mater. 2006. V. 54. No. 19. P. 5051–5059. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.06.038
39. *Youngblood G.E., Rice R.W., Ingel R.I.* Thermal Diffusivity of Partially and Fully Stabilized (Yttria) Zirconia Single Crystals // J. Am. Ceram. Soc. 1988. V. 71. No. 4. P. 255–260.
40. *Bisson J.-F., Fournier D., Poulain M., Lavigne O., Mevrel R.* Thermal Conductivity of Yttria-Zirconia Crystals Determined with Spatially Resolved Infrared Thermography // J. Am. Ceram. Soc. 2000. V. 83. No. 8. P. 1993–1998. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01502.x
41. *Mervrel R., Laizet J.-K., Azzopardi A., Leclercq B., Poulain M., Lavigne O., Demange D.* Thermal Diffusivity and Conductivity of $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$ (x = 0, 0.084 and 0.179) Single Crystals // J. Eur. Ceram. Soc. 2004. V. 24. No. 10–11. P. 3081–3089. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.045

42. *Fèvre M., Finel A., René Caudron R., Mévrel R.* Local Order and Thermal Conductivity in Yttria-Stabilized Zirconia. II. Numerical and Experimental Investigations of Thermal Conductivity // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 104118. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104118
43. *Hasselman D.P.H., Johnson L.F., Benten H.D., Syed R., Lee H.M., Swain M.V.* Thermal Diffusivity and Conductivity of Dense Polycrystalline ZrO_2 Ceramics: a Survey // Am. Ceram. Soc. Bull. 1987. V. 66. No. 5. P. 799–806.
44. *Raghavan S., Wang H., Dinwiddie R.B., Porter W.D., Mayo M.J.* The Effect of Grain Size, Porosity, and Yttria Content on the Thermal Conductivity of Nanocrystalline Zirconia // Scr. Mater. 1998. V. 39. No. 8. P. 1119–1125. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00290-5
45. *Попов П.А., Соломенник В.Д., Ломонова Е.Е., Борик М.А., Мызина В.А.* Теплопроводность монокристаллических твердых растворов ZrO_2–Y_2O_3 в интервале температур 50–300 K // ФТТ. 2012. Т. 54. № 3. С. 615–618.
46. *Борик М.А., Волкова Т.В., Кулебякин А.В., Курицына И.Е., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Милович Ф.О., Рябочкина П.А., Табачкова Н.Ю., Зенцова А.И., Попов П.А.* Теплопроводность кубических монокристаллов ZrO_2, стабилизированных оксидом иттрия // ФТТ. 2020. Т. 62. № 1. С. 191–195. https://doi.org/10.21883/FTT.2020.01.48759.571
47. *Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E.* Crucible-Free Methods of Growing Oxide Crystals from the Melt // Ann. Rev. Mater. Sci. 2003. V. 17. No 1. P. 101–122. https://doi.org/10.1146/annurev.ms.17.080187.000533
48. *Попов П.А.* Теплопроводность твердотельных оптических материалов на основе неорганических оксидов и фторидов: Дис. докт. физ.-мат. наук. М.: МГТУ им. Баумана, 2015. 532 с. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25834920_44480264.pdf
49. *Borik M.A., Volkova T.V., Kuritsyna I.E., Lomonova E.E., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu.* Features of the Local Structure and Transport Properties of ZrO_2–Y_2O_3–Eu_2O_3 Solid Solutions // J. Alloys Compd. 2019. V. 770. P. 320–326. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.117
50. *Воронько Ю.К., Горбачев А.В., Соболь А.А.* Комбинационное рассеяние света и строение кубических твердых растворов на основе диоксида циркония и гафния // ФТТ. 1995. Т. 37. С. 1939–1952.
51. *Tabares J.A.M., Anglada M.J.* Quantitative Analysis of Monoclinic Phase in 3Y-TZP by Raman Spectroscopy // J. Am. Ceram. Soc. 2010. V. 93. No. 6. P. 1790–1795. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03635.x

REFERENCES

1. Basu R.N. *Materials for Solid Oxide Fuel Cells. Chapter 12 in Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. Ed. Basu S. New Delhi: Anamaya, 2006. 286 p.
2. Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P. Thermal-Barrier Coatings for More Efficient Gas-Turbine Engines. *MRS Bull.* 2012. V.37. P. 891. https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232
3. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. V. 83. No. 3. P. 461–487. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x
4. Yildirim H., Pachter R. Extrinsic Dopant Effects on Oxygen Vacancy Formation Energies in ZrO_2 with Implication for Memristive Device Performance. *ACS Appl. Electron. Mater.* 2019. V. 1. No. 4. P. 467–477. https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00090
5. Kelly J.R., Denry I. Stabilized Zirconia as a Structural Ceramic: an Overview. *Dent. Mater.* 2008. V. 24. P. 289–298. https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.005
6. Mahato N., Banerjeea A., Gupta A., Omar Sh., Balani K. Progress in Material Selection for Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Review. *Prog. Mater. Sci.* 2015. V. 72. P. 141–337. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.001
7. Nishimura T., Kojima T., Nagashio K., Niwa M. Ion Conductive Character of Low-Yttria-Content Yttria-Stabilized Zirconia at Low Temperature. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2021. V. 60. No. SB. P. SBBF03. https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6dc
8. Zhou S., Shen S., Chen Y., Zhang Z., Wu S. Fast Synthesis of Novel Micron Porous Particles of Gd, Yb and Y-Stabilized Zirconia to Prepare TBCs with Low Thermal Conductivity. *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 259. P. 124018. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124018
9. Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E. *Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique in: Springer Hahdbook of Crystal Growth*. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 433 p.
10. Yuan J., Zhou X., Dong S., Jiang J., Deng L., Song W., Dingwell D.B., Cao X. Plasma Sprayed 18 mol. % $YO_{1.5}$ Stabilized Hafnia as Potential Thermal Barrier Coating. *Ceram. Int.* 2021. V. 47. No. 10. P. 14515–14526. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.031
11. Kim Y., Kim J., Han J.-W., Choi J. Multiscale Mechanics of Yttria Film Formation During Plasma Spray Coating. *Appl. Surface Sci.* 2022. V. 572. P. 151416. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151416
12. Zhang J., Lenser C., Menzler N.H., Guillon O. Comparison of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Electrolyte Materials for Operation at 500°C. *Solid State Ionics.* 2020. V. 344. P. 115138. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115138
13. Rocha R.A., Muccillo E.N.S., Dessemonda L., Djurado E. Thermal Ageing of Nanostructured Tetragonal Zirconia Ceramics: Characterization of Interfaces. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2010. V. 30. No. 2. P. 227–231. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.05.004

14. Araki W., Koshikawa T., Yamaji A., Adachi T. Degradation Mechanism of Scandia-Stabilised Zirconia Electrolytes: Discussion Based on Annealing Effects on Mechanical Strength, Ionic Conductivity, and Raman Spectrum. *Solid State Ionics*. 2009. V. 180. No. 28–31. P. 1484–1489. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.09.001
15. Sharma A., Witz G., Howell P.C., Hitchman N. Interplay of the Phase and the Chemical Composition of the Powder Feedstock on the Properties of Porous 8YSZ Thermal Barrier Coatings. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021. V. 41. No. 6. P. 3706–3716. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.062
16. Kimura Y., Kushi T., Unemoto A., Amezawa K., Kawada T. Influence of Aging on Mechanical Properties of Yttria-Doped Zirconia. *Ceramics*. 2018. V. 1. No. 2. P. 287–303. https://doi.org/10.3390/ceramics1020023
17. Itoh H., Mori M., Idemoto Y., Imai H., Nakayama M. Annealing Effect on Phase Stability of Doped Zirconia Using Experimental and Computational Studies. *Solid State Ionics*. 2016. V. 297. P. 20–28. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.09.026
18. Nomura K., Mizutani Y., Kawai M., Nakamura Y., Yamamoto O. Aging and Raman Scattering Study of Scandia and Yttria Doped Zirconia. *Solid State Ionics*. 2000. V. 132. No. 3–4. P. 235–239. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00648-2
19. Lawson S. Environmental Degradation of Zirconia Ceramics, Review. *J. Eur. Ceram. Soc.* 1995. V. 15. P. 485–502. https://doi.org/10.1016/0955-2219(95)00035-S
20. Pecharrom´an C., Bartolom´e J.F., Requena J., Moya J.S., Deville S., Chevalier J., Fantozzi G., Torrecillas R. Percolative Mechanism of Aging in Zirconia Containing Ceramics for Medical Applications. *Adv. Mater.* 2003. V. 15. P. 507. https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08696
21. Badwal S.P.S. Stability of Solid Oxide Fuel Cell Components. *Solid State Ionics*. 2001. V. 143. No. 1. P. 39–46. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(01)00831-1
22. Araki W., Koshikawa T., Yamaji A., Adachi T. Degradation Mechanism of Scandia-Stabilised Zirconia Electrolytes: Discussion Based on Annealing Effects on Mechanical Strength, Ionic Conductivity, and Raman Spectrum. *Solid State Ionics*. 2009. V. 180. No. 28–31. P. 1484–1489. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.09.001
23. Girolamo G., Blasi C., Schioppa M., Tapfer L. Structure and Thermal Properties of Heat Treated Plasma Sprayed Ceria–Yttria Co-Stabilized Zirconia Coatings. *Ceram. Int.* 2010. V. 36. No. 3. P. 961–968. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.10.020
24. Jones R.L., Reidy R.F., Mess D. Scandia, Yttria-Stabilized Zirconia for Thermal Barrier Coatings. *Surf. Coat. Technol.* 1996. V. 82. No. 1–2. P. 70–76. https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02646-0
25. Liu H., Li S., Li Q., Li Y. Investigation on the Phase Stability, Sintering and Thermal Conductivity of Sc_2O_3–Y_2O_3–ZrO_2 for Thermal Barrier Coating Application. *Mater. Des.* 2010. V. 31. P. 2972–2977. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.019
26. Yashima M., Kakihana M., Yoshimura M. Metastable-Stable Phase Diagrams in the Zirconia-Containing Systems Utilized in Solid-Oxide Fuel Cell Application. *Solid State Ionics*. 1996. V. 86–88. No. 2. P. 1131–1149. https://doi.org/10.1016/0167-2738(96)00386-4
27. Suzuki Y. Phase Transition Temperature of Fluorite-Type ZrO_2–Y_2O_3 Solid Solutions Containing 8–44 mol. % Y_2O_3. *Solid State Ionics*. 1995. V. 81. No. 3–4. P. 211–216. https://doi.org/10.1016/0167-2738(95)00186-A
28. Gotsch T., Wallisch W., Stoger-Pollach M., Klotzer B., Penner S. From Zirconia to Yttria: Sampling the YSZ Phase Diagram Using Sputter-Deposited Thin Films. *AIP Adv.* 2016. V. 6. No. 2. P. 025119. https://doi.org/10.1063/1.4942818
29. Chen M., Hallstedt B., Gauckler L.J. Thermodynamic Modeling of the ZrO_2–$YO_{1.5}$ system. *Solid State Ionics*. 2004. V. 170. No. 3–4. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.02.017
30. Andrievskaya E.R. Phase Equilibria in the Refractory Oxide Systems of Zirconia, Hafnia and Yttria with Rare-Earth Oxides. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2008. V. 28. No. 12. P. 2363–2388. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.01.009
31. Ruh R., Garrett H.J., Domogala R.F., Patel V.A. The System Zirconia-Scandia. *J. Eur. Ceram. Soc.* 1977. V. 60. No. 9–10. P. 399–403. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15521.x
32. Sheu T.-S., Xu J., Tien T.-Y. Phase Relationships in the ZrO_2–Sc_2O_3 and ZrO_2–In_2O_3 Systems. *J. Am. Ceram. Soc.* 1993. V. 76. No. 8. P. 2027–2032. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb08328.x
33. Wen T., Yuan L., Liu T., Sun Q., Jin E., Tian C., Yu J. Enhanced Ionic Conductivity and Thermal Shock Resistance of MgO Stabilized ZrO_2 Doped with Y_2O_3. *Ceram. Int.* 2020. V. 46. No. 12. P. 19835–19842. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.038
34. Bhandari K., Grover V., Roy A., Bhatt R., Banerjee J., Tyagi A.K. $(Y_{1-x}Nd_x)_3Zr_5O_{14.5}$ Solid Solutions as Inert Matrices: Phase Evolution, Order-Disorder Dynamics and Thermophysical Behavior. *Mater. Today Commun*. 2021. V. 27. P. 102158. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102158
35. Ma W., Gao Y., Zhang J., Bai Y., Jia R., Dong H., Wang R., Bao M. Phase Composition, Microstructure and Thermophysical Properties of the $Sr_x(Zr_{0.9}Y_{0.05}Yb_{0.05})O_{1.95+x}$ Ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021. V. 41. No. 4. P. 2734–2745. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.031
36. Zhou S., Shen S., Chen Y., Zhang Z., Wu S. Fast Synthesis of Novel Micron Porous Particles of Gd, Yb and Y-Stabilized Zirconia to Prepare TBCs with Low Thermal Conductivity. *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 259. P. 124018. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124018

37. Chen D., Wang Q., Liu Y., Ning X. Microstructure, Thermal Characteristics, and Thermal Cycling Behavior of the Ternary Rare Earth Oxides (La_2O_3, Gd_2O_3, and Yb_2O_3) Co-doped YSZ Coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 403. P. 126387. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126387
38. Winter M.R., Clarke D.R. Thermal Conductivity of Yttria-Stabilized Zirconia–Hafnia Solid Solutions. *Acta Mater.* 2006. V. 54. No. 19. P. 5051–5059. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.06.038
39. Youngblood G.E., Rice R.W., Ingel R.I. Thermal Diffusivity of Partially and Fully Stabilized (Yttria) Zirconia Single Crystals. *J. Am. Ceram. Soc.* 1988. V. 71. No. 4. P. 255–260.
40. Bisson J.-F., Fournier D., Poulain M., Lavigne O., Mevrel R. Thermal Conductivity of Yttria-Zirconia Crystals Determined with Spatially Resolved Infrared Thermography. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. V. 83. No. 8. P. 1993–1998. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01502.x
41. Mervrel R., Laizet J.-K., Azzopardi A., Leclercq B., Poulain M., Lavigne O., Demange D. Thermal Diffusivity and Conductivity of $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$ (x = 0, 0.084 and 0.179) Single Crystals. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2004. V. 24. No. 10–11. P. 3081–3089. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.045
42. Fèvre M., Finel A., René Caudron R., Mévrel R. Local Order and Thermal Conductivity in Yttria-Stabilized Zirconia. II. Numerical and Experimental Investigations of Thermal Conductivity. *Phys. Rev. B.* 2005. V. 72. P. 104118. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104118
43. Hasselman D.P.H., Johnson L.F., Benten H.D., Syed R., Lee H.M., Swain M.V. Thermal Diffusivity and Conductivity of Dense Polycrystalline ZrO_2 Ceramics: a Survey. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 1987. V. 66. No. 5. P. 799–806.
44. Raghavan S., Wang H., Dinwiddie R.B., Porter W.D., Mayo M.J. The Effect of Grain Size, Porosity, and Yttria Content on the Thermal Conductivity of Nanocrystalline Zirconia. *Scr. Mater.* 1998. V. 39. No. 8. P. 1119–1125. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00290-5
45. Popov P.A., Solomennik V.D., Lomonova E.E., Borik M.A., Myzina V.A. Thermal Conductivity of Single Crystal ZrO_2 –Y_2O_3 Solid Solutions in the Temperature Range 50–300 K. *Phys. Sol. State.* 2012. V. 54. No. 3. P. 658–661. https://doi.org/10.1134/S1063783412030250
46. Borik M.A., Volkova T.V., Kulebyakin A.V., Kuritsyna I.E., Lomonova E.E., Myzina V.A., Milovich F.O., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu., Zentsova A.I., Popov P.A. Thermal Conductivity of Cubic ZrO_2 Single Crystals Stabilized with Yttrium Oxide. *Phys. Sol. State.* 2020. V. 62. No. 1. P. 235–239. https://doi.org/10.1134/S1063783420010072
47. Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E. Crucible-Free Methods of Growing Oxide Crystals from the Melt // *Ann. Rev. Mater. Sci.* 2003. V. 17. No 1. P. 101–122. https://doi.org/10.1146/annurev.ms.17.080187.000533
48. Popov P.A. *The Thermal Conductivity of Solid Optical Materials Based on Inorganic Oxides and Fluorides*. Thesis of the Doctor of Science in Physics and Mathematics. Moscow. 2015. 532 p. (in Russian)
49. Borik M.A., Volkova T.V., Kuritsyna I.E., Lomonova E.E., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu. Features of the Local Structure and Transport Properties of ZrO_2–Y_2O_3–Eu_2O_3 Solid Solutions. *J. Alloys Compd.* 2019. V. 770. P. 320–326. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.117
50. Voronko Yu.K., Gorbachev A.V., Sobol A.A. Raman Scattering and the Structure of Cubic Solid Solutions Based on Zirconium and Hafnium Dioxide. *Sov. Phys. Solid State.* 1995. V. 37. P. 1055–1069
51. Tabares J.A.M., Anglada M.J. Quantitative Analysis of Monoclinic Phase in 3Y-TZP by Raman Spectroscopy. *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. V. 93. No. 6. P. 1790–1795. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03635.x

Поступила в редакцию 28.11.2025 г.
После доработки 19.01.2026 г.
Принята к публикации 20.01.2026 г.

Received November 28, 2025
Revised January 19, 2026
Accepted January 20, 2026