УДК 546.831.4-162 *Оригинальная статья*

# Синтез и физико-механические характеристики функциональной керамики системы $Er_2O_3$/ScSZ

И.А. Сурков[1], Л.А. Пасечник[2], О.И. Гырдасова[2]

*[1]ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

*620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19*

*[2]ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»*

*620078, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91*

*pasechnik@ihim.uran.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.144

**Аннотация:** Твердые растворы системы $Er_2O_3$/*ScSZ* синтезированы золь-гель методом с использованием этиленгликоля в качестве органического компонента, что обеспечивает высокую гомогенность распределения допантов в матрице $ZrO_2$. Термолиз промежуточного золя на воздухе при 700°C приводит к формированию составов $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ ($x$ = 0-0,04) на основе тетрагональной фазы *t–*$ZrO_2$. При температуре 1500 °C получены керамические образцы с относительной плотностью 96-98%. По данным рентгенофазового анализа в интервале $x$ = 0-0,01 спеченная керамика представляет собой смесь кубической (*c–*$ZrO_2$) и ромбоэдрической (*r–*$ZrO_2$) фаз, а при $x$ = 0,02-0,04 формируется однофазная кубическая структура. Сканирующая электронная микроскопия показывает хорошо спеченную микроструктуру с плотным прилеганием зерен друг к другу, поры являются закрытыми и имеют субмикронные размеры. Микротвердость варьируется на уровне 12,3-15,6 ГПа, что соответствует показателям традиционной технической керамики на основе $ZrO_2$. Содопирование эрбием почти в два раза увеличивает предел прочности на изгиб с 81,2 МПа (нелегированный *ScSZ*) до 150,2 МПа для состава $Zr_{0,8}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$. Полученное значение превышает типичную прочность нестабилизированной керамики $ZrO_2$ и свидетельствует о выраженном упрочняющем действии эрбия. Данный эффект, обусловлен трансформационным механизмом упрочнения, а также снижением пористости и оптимизацией микроструктуры благодаря золь-гель синтезу. Для обеспечения стабильности термомеханических и термоэлектрических характеристик в условиях длительной и циклической эксплуатации предпочтителен уровень содопирования 2-3 мол.% *Er* ($x$ = 0,02-0,03), при котором керамика имеет однофазную структуру *c–*$ZrO_2$, исключающую нежелательные фазовые переходы в рабочем диапазоне температур. При таком легировании достигается наилучшее сочетание прочности (~154 МПа) и микротвердости (~14,5-15,0 ГПа), что снижает риск деградации свойств. Таким образом, разработанные материалы $Er_2O_3$/*ScSZ* являются перспективными материалами для твердооксидных топливных элементов, обеспечивая высокую плотность, механическую прочность и фазовую стабильность.

*Ключевые слова: скандий стабилизированный оксид циркония, содопирование, оксид эрбия, золь-гель синтез, микротвердость, прочность на изгиб.*

*Сурков Илья Александрович – магистрант 1 курса, Институт новых материалов и технологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

*Пасечник Лилия Александровна – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»*

*Гырдасова Ольга Ивановна – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории неорганического синтеза, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»*

© И.А. Сурков, Л.А. Пасечник, О.И. Гырдасова, 2026

*Original paper*

**Synthesis and physico-mechanical characteristics of functional $Er_2O_3$/*ScSZ* ceramics**

I.A. Surkov[1], L.A. Pasechnik[2], O.I. Gyrdasova[2]

[1]*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia*

[2]*The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.144

**Abstract:** Solid solutions of the $Er_2O_3$/*ScSZ* system were synthesized by a sol-gel method using ethylene glycol as an organic component, which ensures high homogeneity of dopant distribution in the $ZrO_2$ matrix. Thermolysis of the intermediate sol in air at 700 °C leads to the formation of $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ ($x$ = 0-0,04) compositions based on the tetragonal $t$–$ZrO_2$ phase. Ceramic samples with a relative density of 96-98% were obtained at 1500°C. According to X-ray diffraction data, in the range x = 0-0,01 the sintered ceramics consist of a mixture of cubic ($c$–$ZrO_2$) and rhombohedral ($r$–$ZrO_2$) phases, whereas at $x$ = 0,02-0,04 a single-phase cubic structure is formed. Scanning electron microscopy reveals a well-sintered microstructure with grains closely adhering to each other; pores are closed and have submicron dimensions. The microhardness ranges from 12,3 to 15,6 GPa, which is comparable to that of conventional technical ceramics based on $ZrO_2$. Co-doping with erbium almost doubles the flexural strength, raising it from 81,2 MPa (undoped *ScSZ*) to 150,2 MPa for the composition $Zr_{0,8}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$. This value exceeds the typical strength of unstabilized $ZrO_2$ ceramics and demonstrates a pronounced strengthening effect of erbium. The observed strengthening is attributed to the transformation toughening mechanism, as well as to reduced porosity and microstructural optimization achieved through the sol-gel synthesis. To ensure stability of thermomechanical and thermoelectric characteristics under long-term and cyclic operating conditions, a co-doping level of 2-3 mol.% *Er* ($x$ = 0,02-0,03) is preferable, which yields a single-phase $c$–$ZrO_2$ structure that prevents unwanted phase transitions in the working temperature range. Such doping provides the best combination of strength (~154 MPa) and microhardness (~14,5-15,0 GPa), thereby reducing the risk of property degradation. Thus, the developed $Er_2O_3$/*ScSZ* materials represent a promising alternative to conventional electrolytes for solid oxide fuel cells, offering high density, mechanical strength, and phase stability.

*Keywords: scandium stabilized zirconium oxide, co-doping, erbium oxide, sol-gel synthesis, microhardness, bending strength.*

*I'lya A. Surkov – 1st year graduate student of the Institute of New Materials and Technologies; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*

*Liliya A. Pasechnik – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-0631-5287*

*Olga I. Gyrdasova – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Inorganic Synthesis, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-0680-6094*

Поступила в редакцию/received: 20.05.2026; после рецензирования/revised: 15.06.2026; принята/accepted: 17.06.2026.

## 1. Введение

Электролиты для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) с ионообменной мембраной принято разделять на две основные группы. Первую из них составляют протон-проводящие материалы, вторую, значительно более обширную, – материалы с кислород-ионной проводимостью [1, 2]. Протонные проводники представлены оксидами со структурой перовскита $ABO_3$, где $A$ – ион щелочноземельного металла, $B$ – катион в степени окисления 4+ (например, $Ce^{4+}$ или $Zr^{4+}$) [3]. Круг кислород-ионных проводников значительно шире, при этом предпочтение отдается электролитам на основе диоксидов циркония и церия. Это

обусловлено, в частности, совместимостью кислород-проводящих электролитов с большинством электродных материалов по тепловому расширению, а также их меньшей склонностью к долговременной деградации по сравнению с протон-проводящими аналогами [4].

В настоящее время в качестве высокотемпературных ТОТЭ наиболее широко используются электролиты на основе $ZrO_2$. Это объясняется их высокой химической и термической стабильностью, практически единичным числом переноса ионов, а также невысокой стоимостью по сравнению с другими типами электролитов [5, 6]. Легирование диоксида циркония гетеровалентными ионами стабилизирует кубическую структуру флюорита и приводит к возникновению кислородных вакансий, что, в свою очередь, создает «супермагистрали» для ионов кислорода, повышая ионную проводимость материала [7]. В большинстве коммерческих электролитов на основе диоксида циркония в качестве легирующих добавок используют оксид церия, оксид иттрия либо оксид скандия. Наибольшие значения ионной проводимости достигаются для твердых растворов с содержанием 10-11 мол.% $Sc_2O_3$. Однако при охлаждении до температур 500-700°С кубическая структура таких электролитов претерпевает фазовый переход в ромбоэдрическую с упорядочением кислородных вакансий, проводимость которой, на порядок ниже, чем у кубической фазы $c-ZrO_2$ [8]. Кроме того, данный фазовый переход сопровождается понижением механической прочности, что является ограничивающим недостатком керамики на основе скандий-стабилизированного диоксида циркония ($ScSZ$).

К настоящему времени предложен ряд подходов к подавлению нежелательного фазового перехода. Наиболее распространенным из них является дополнительное легирование $ScSZ$ оксидами других редкоземельных элементов ($R_2O_3$), которые хорошо растворяются в матрице $ZrO_2$ и не образуют с ним химических соединений. Замещение части катионов $Sc^{3+}$ на другой трехвалентный катион $R^{3+}$, в отличие от введения гетеровалентных ионов, не приводит к увеличению концентрации кислородных дефектов, поскольку компенсация заряда в этом случае отсутствует. Данное обстоятельство имеет существенное значение, так как транспортные свойства электролитов ТОТЭ чувствительны к концентрации кислородных вакансий [9]. Большое количество исследований посвящено керамическим системам $ScSZ$, допированным $Y_2O_3$, $Yb_2O_3$ или $Gd_2O_3$, а также четырехвалентными оксидами – $CeO_2$ и $HfO_2$ [9–11]. Отмечается, что керамика указанных составов обладает высокими прочностными характеристиками. К сожалению, данные о системе $Er_2O_3/ScSZ$ в литературе немногочисленны. Следует

также отметить, что на фазовый состав и электрохимические свойства электролитов ТОТЭ с промежуточным слоем влияние оказывают не только химический состав допантов [12,13], но и способ синтеза исходного порошка [14,15]. Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что поиск составов твердых растворов $ZrO_2/R_2O_3$ с улучшенными механическими характеристиками и создание керамики является сложной и нетривиальной задачей, требующей комплексного подхода. Для керамических материалов оптимизация состава осложняется неоднозначностью экспериментальных данных для образцов, полученных разными методами, а также определяется внутренней зеренной структурой.

В настоящей работе с использованием золь-гель метода получены образцы системы $Er_2O_3/ScSZ$, а также исследованы прочностные характеристики спеченной циркониевой керамики перед последующей оценкой ее электрохимических свойств в качестве материала ТОТЭ.

## 2. Экспериментальная часть

В основе методики синтеза образцов лежит взаимодействие нитратов металлов (циркония, скандия и эрбия) с многоатомными спиртами. В качестве многоатомного спирта предложен этиленгликоль, который является растворителем нитратов и хелатирующим агентом в реакции формирования геля. Реакция протекает с активным выделением окислов азота. Образующийся коллоидный раствор при нагреве быстро переходит в состояние порошкообразного золя, который в результате термолиза на воздухе при 700-800°C образует твердый раствор $Zr_{0.8}Sc_{0.2-x}Er_xO_2$ ($0{,}01 \le x \le 0{,}04$). Из порошков $Zr_{0.8}Sc_{0.2-x}Er_xO_2$ были изготовлены прямоугольные керамические бруски размером 5×5×10 мм при температуре 1500°C Кинетику спекания исследовали на воздухе в интервале температур 20-1500°C со скоростью нагрева 5 град мин$^{-1}$ с использованием дилатометра Netzsch DIL 402C.

Фазовый анализ продуктов термолиза проводили на дифрактометре Shimadzu в $CuK_{\alpha 1}$ излучении, интервал углов 10°-120°, шаг съемки 0,03°, время на точку 2 с. Морфологию и состав прекурсоров и продуктов их термолиза исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6390LA, снабженного энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром EX-23010BU (ЭДС). Измерения прочности на изгиб проводили на электромеханической испытательной машине Liangong CMT-5L на образцах прямоугольной формы при трехточечной нагрузке со скоростью перемещения 1 мм/мин. Прочность на изгиб ($\sigma_{bend}$, МПа) рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{bend} = 3PL / 2bh^2, \quad (1)$$

где $P$ – разрушающая нагрузка (Н), $L$ – расстояние между опорами (35 мм), $b$ – ширина образца (мм), а $h$ – высота образца (мм). Результаты усреднены по двум измерениям со стандартным отклонением 5%. Микротвердость ($HV$, ГПа) измеряли с помощью твердомера ПМТ-3М с нагрузкой 100 г (0,98 Н), время выдержки 10 с. Для каждого образца проводили десять измерений со стандартным отклонением не более 5%.

## 3. Результаты и обсуждение

Дифрактограммы на рис. 1 для всех порошковых образцов $Zr_{0.8}Sc_{0.2-x}Er_xO_2$ ($0{,}01 \le x \le 0{,}04$) после отжига при 700°С имеют схожий профиль, что свидетельствует о вхождении обоих трёхвалентных допантов ($Sc^{3+}$ и $Er^{3+}$) в кристаллическую решетку $t-ZrO_2$. При увеличении доли эрбия наблюдается уширение дифракционных рефлексов и уменьшение их интенсивности, что обусловлено измельчением кристаллитов при содопировании. Данный эффект способствует последующему уплотнению керамики при спекании за счет повышения поверхностной энергии.

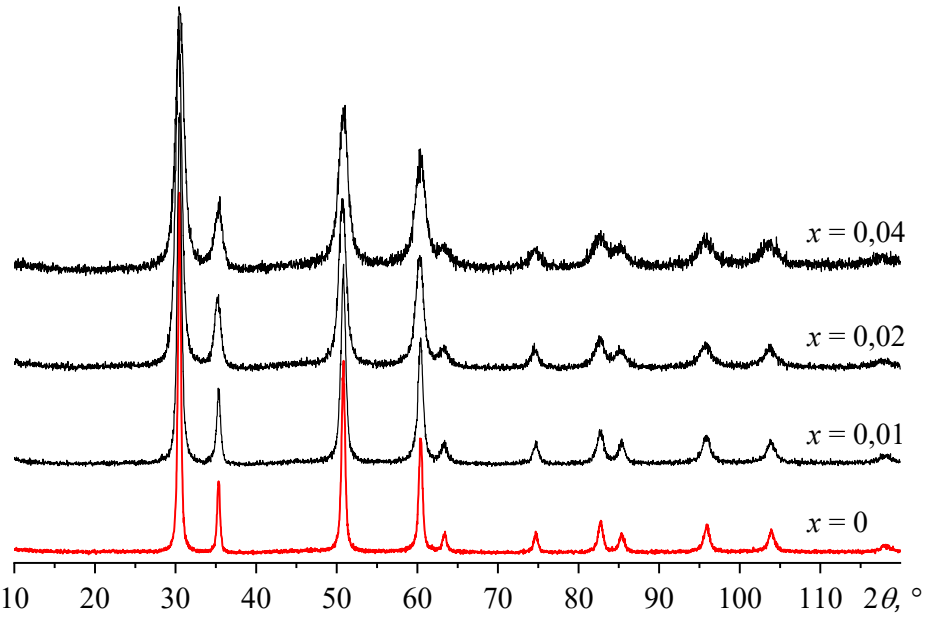


Рис. 1. Рентгенограммы порошков $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ ($0{,}01 \le x \le 0{,}04$).

Из полученных порошковых материалов при температуре 1500°С была изготовлена газоплотная керамика. По данным РФА спеченная керамика $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ в интервале $x =$ 0-0,01 индицируется как смесь кубической ($c-ZrO_2$) и ромбоэдрической ($r-ZrO_2$) фаз, а при $x = 0{,}02$-$0{,}04$ – только как кубическая $c-ZrO_2$. Относительная плотность керамики составила 96-98%. Были рассчитаны коэффициенты теплового расширения (КТР), которые приведены в Таблице 1.

Таблица 1. КТР керамических материалов $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$.

| Состав | $\Delta T$, °C | КТР×10$^{-6}$, см/(см·K) |
|---|---|---|
| $Zr_{0,8}Sc_{0,2}O_2$ | 20-650 /670-1200 | 9,93±0,01 / 11,85±0,01 |
| $Zr_{0,80}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$ | 20-550 / 570-1200 | 9,87±0,01 / 11,51±0,01 |
| $Zr_{0,80}Sc_{0,18}Er_{0,02}O_2$ | 20-1200 | 11,22±0,02 |
| $Zr_{0,80}Sc_{0,17}Er_{0,03}O_2$ | 20-1200 | 11,40±0,02 |
| $Zr_{0,80}Sc_{0,16}Er_{0,04}O_2$ | 20-1200 | 11,06±0,02 |

Для первых двух составов наблюдается изменение угла наклона кривой в области температур 550-650°C вследствие проявления фазового перехода $c \leftrightarrow r$, присущего системе $ScSZ$. Появление содопанта – эрбия в системе в количестве $x = 0{,}02$ привело к фазовой стабилизации со значениями КТР около 11,06-11,40×10$^{-6}$, см/(см·K) во всем температурном интервале 20-1200°C. Эти результаты превышают значения для содопированного иттрием $ScSZ$, как в покрытии (10,80×10$^{-6}$, см/(см·K)) [16], так и в керамике (10,30×10$^{-6}$, см/(см·K)) [17]. В то же время они близки к данным для керамики (11,93×10$^{-6}$, см/(см·K)), полученной из оксида циркония, осажденного при переработке красного шлама, и содержащего кроме скандия примеси других металлов [18].

Микроструктурные исследования методом СЭМ подтверждают формирование хорошо спеченной плотной керамики с единичными закрытыми порами на основе всех составов $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ (см. рис. 2 а-г). Зерна оксида циркония имеют четко выраженные границы, что указывает на достижение равновесных форм при спекании. Размер зерна варьируется от 5 до 20 мкм не зависимо от состава. Гомогенное распределение допантов – скандия и эрбия в $ZrO_2$ показано на примере образца $Zr_{0,80}Sc_{0,16}Er_{0,04}O_2$ (см. рис. 2 д, ж). Количественное содержание по данным ЭДС анализа составляет (моль.%): 86,6 $ZrO_2$, 11,3 $Sc_2O_3$, 2,1 $Er_2O_3$. Результаты подтверждают заданное при синтезе соотношение компонентов в соответствии с формулой $Zr_{0,80}Sc_{0,16}Er_{0,04}O_2$.

Термическая обработка (отжиг) приводит к образованию более однородных зерен с гладкими контурами, что положительно влияет на механические свойства керамики на основе $ZrO_2 - R_2O_3$ [9-11, 19]. При этом рост зерен и уменьшение количества границ между кристаллическими областями могут способствовать появлению областей напряжений и далее к зарождению и развитию микротрещин, снижая прочность материала именно вдоль границ зерен. Поэтому далее для керамических материалов определены две ключевые механические характеристики – микротвердость по Виккерсу и прочность на изгиб (см. Таблицу 2).

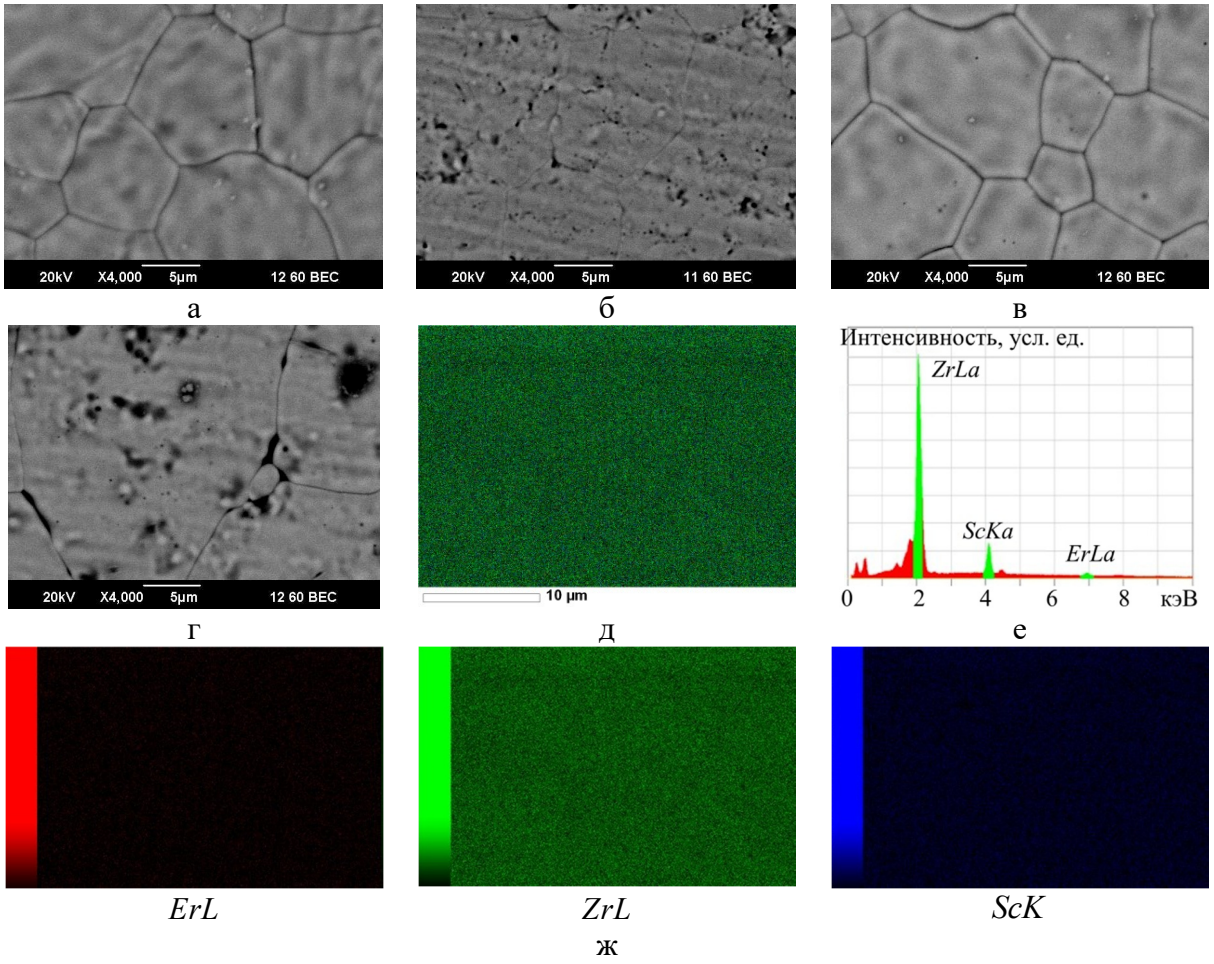


Рис. 2. СЭМ-изображения керамических образцов $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ при $x$ : а – 0; б – 0,01; в – 0,02; г – 0,04; результаты ЭДС анализа образца $Zr_{0,8}Sc_{0,16}Er_{0,04}O_2$: д – общая карта элементов, е – ЭДС спектр, ж – индивидуальные карты $Er$, $Zr$ и $Sc$.

Таблица 2. Значения микротвердости и предела прочности керамики $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$.

| Состав | Микротвердость по Виккерсу ($HV$), ГПа | Прочность на изгиб ($\sigma_{bend}$), МПа (±10) |
|---|---|---|
| $Zr_{0,8}Sc_{0,2}O_2$ | 13,9±2,2 | 81,2 |
| $Zr_{0,8}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$ | 12,3±2,3 | 150,2 |
| $Zr_{0,8}Sc_{0,18}Er_{0,02}O_2$ | 15,6±1,7 | 136,6 |
| $Zr_{0,8}Sc_{0,17}Er_{0,03}O_2$ | 14,6±1,7 | 154,6 |
| $Zr_{0,8}Sc_{0,16}Er_{0,04}O_2$ | 15,0±3,9 | 153,5 |

Наименьшая прочность (81,2 МПа) соответствует образцу $ScSZ$, который при этом имеет достаточно высокую микротвердость (13,9 ГПа) близкую к значению 13,5 ГПа для керамики $YSZ$ на основе $t-ZrO_2$, содержащей 3 моль % $Y_2O_3$ и полученной при 1350°С [20]. Для остальных образцов $Zr_{0.8}Sc_{0.2-x}Er_xO_2$ прочность на изгиб стабильно превышает 130 МПа и достигает максимума 154,6 МПа для $Zr_{0,80}Sc_{0,17}Er_{0,03}O_2$, тогда как

микротвердость варьируется в диапазоне 12–16 ГПа без явной корреляции с прочностью. Такое поведение типично для керамики с трансформационным механизмом упрочнения ($t \to m$ под действием напряжений) [13]. Высокая прочность при умеренной микротвердости указывает на то, что определяющим фактором является не сопротивление локальной пластической деформации, а способность материала подавлять рост трещин за счет фазового перехода. Структура образцов *ScSZ* и $Zr_{0,80}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$ находится вблизи границы фазовой трансформации – возможно, формируется кубическая модификация, не способная к мартенситному превращению. Это согласуется с ранее отмеченным эффектом [21,22]: содопирование может приводить к переходу в область однофазных кубических твердых растворов, где механизм фазового упрочнения подавлен, вследствие чего прочность резко падает. При введении эрбия проявляется выраженное упрочнение: прочность возрастает почти вдвое по сравнению с образцом *ScSZ* (с 81 до ~150 МПа). При этом микротвердость изменяется немонотонно: минимальная твердость (12,3 ГПа) у образца $Zr_{0,80}Sc_{0,19}Er_{0,01}O_2$, который, тем не менее, имеет прочность 150,2 МПа. Это подтверждает, что прочность определяется не твердостью, а вкладом трансформационного механизма.

Поскольку видимых изменений зеренной структуры при увеличении содержания содопанта – эрбия не наблюдалось, повышение прочности связано главным образом с трансформационным упрочнением. При нормальных условиях (комнатная температура) именно этот механизм вносит основной вклад. Ферроэластичная переориентация доменов, характерная для тетрагональной фазы [21], становится значимой при температурах выше температуры фазового перехода, что в данном исследовании не рассматривалось.

Наиболее высокую прочность (154,56 и 153,55 МПа) показали образцы с $x$=0,02-0,03 при микротвердости около 14,5-15,0 ГПа. Это указывает на оптимальный диапазон солегирования эрбием, при котором сохраняется высокая доля трансформируемой тетрагональной фазы, а стабильность границ зерен достаточна для предотвращения межзеренного разрушения. Введение уже 1 мол.% эрбия в состав *ScSZ* позволяет увеличить предел прочности почти в два раза. Однако для обеспечения стабильности термомеханических и термоэлектрических характеристик в условиях длительной эксплуатации предпочтительно повышение уровня содопирования до 2-3 мол.%. При этом достигается наилучшее сочетание прочности (~154 МПа) и достаточно высокой микротвердости (~14,5-15,0 ГПа), что снижает риск деградации свойств при теплосменах. По-видимому, здесь удается достичь оптимальной комбинации фаз, когда в структуре сохраняется достаточное количество трансформируемой $t' - ZrO_2$

фазы, но появляется достаточно стабилизатора, чтобы подавить нежелательные фазовые переходы при высоких температурах во время работы устройства. Именно такая стабильность и требуется для долговечных термоэлектрических преобразователей. В то же время, при очень высоком уровне солегирования *ScSZ* можно перейти в область полностью стабилизированного $c-ZrO_2$. Прочность при этом упадет, керамика станет хрупкой, зато появятся уникальные проводящие свойства.

## 4. Заключение

С использованием прекурсорной золь-гель технологии в неводной среде получены образцы состава $Zr_{0,8}Sc_{0,2-x}Er_xO_2$ $(0{,}01 \le x \le 0{,}04)$ на основе твердого раствора кубического $ZrO_2$, из которых изготовлена плотная керамика. Предложенный метод синтеза обеспечивает гомогенное распределение обоих допантов в матрице оксида циркония и фазовую стабилизацию. Полученные результаты подтверждают, что отжиг в сочетании с солегированием эрбием позволяет управлять структурой и фазовым составом керамики *ScSZ*. Ключевым механизмом повышения прочности является трансформационное упрочнение, а оптимальное содержание эрбия лежит в диапазоне 2-3 мол.%, где обеспечивается как высокий предел прочности (~154 МПа), так и стабильность эксплуатационных характеристик.

*Измерения микротвердости и прочности на изгиб выполнены к.х.н. Скачковым В.М. Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТ УрО РАН.*

**Библиографический список:**

1. **Wang, F.** The electrolyte materials for SOFCs of low-intermediate temperature / F. Wang, Y. Lyu, D. Chu et al. // Materials Science and Technology. – 2019. – V. 35. – I. 13. – P. 1551-1562. DOI: 10.1080/02670836.2019.1639008.
2. **Hossain, S.** A review on proton conducting electrolytes for clean energy and intermediate temperature-solid oxide fuel cells / S. Hossain, A.M. Abdalla, S.N.B. Jamain, J.H. Zaini, A.K. Azad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 79. – P. 750-764. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.147.
3. Perovskite materials: synthesis, characterisation, properties, and applications / ed. by L. Pan, G. Zhu // InTechOpen. – 2016. – 650 p. DOI: 10.5772/60469.
4. **Medvedev, D.** Proton-conducting electrolytes for solid oxide fuel cell applications / D. Medvedev, A. Brouzgou, A. Demin, P. Tsiakaras // In book: Advanced medium and high temperature solid oxide fuel cell technology. CISM International Centre for Mechanical Sciences; ed. by M. Boaro, A.A. Salvatore. – Cham: Springer, 2017. – V. 574. – P. 77-118. DOI: 10.1007/978-3-319-46146-5_3.
5. **Mahato, N.** Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: a review / N. Mahato, A. Banerjee, A. Gupta, S. Omar, K. Balani // Progress in Materials Science. – 2015. – V. 72. – P. 141-337. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.001.
6. **Medvedev, D.A.** Advanced materials for SOFC application: strategies for the development of highly conductive and stable solid oxide proton electrolytes / D.A. Medvedev, J.G. Lyagaeva, E.V. Gorbova et al. // Progress in Materials Science. – 2016. – V. 75. – P. 38-79. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.08.001.
7. **Mahato, N.** Doped zirconia and ceria-based electrolytes for solid oxide fuel cells: A review / N. Mahato, A. Gupta, K. Balani // Nanomaterials and Energy. – 2012. – V. 1. – I. 1. – P. 27-45. DOI: 10.1680/NME.11.00004.

8. **Shao, Z.** Application of SOFC Technology / Z. Shao, M.O. Tadé // In book: Intermediate-temperature solid oxide fuel cells. Materials and Applications; ed. by Z. Shao, M.O. Tadé. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. – P. 247-266. DOI: 10.1007/978-3-662-52936-2.
9. **Arachi, Y.** Electrical conductivity of $ZrO_2$ –$Sc_2O_3$ doped with $HfO_2$, $CeO_2$, and $Ga_2O_3$ / Y. Arachi, T. Asai, O. Yamamoto et al. // Journal of the Electrochemical Society. – 2001. – V. 148. – I. 5. – P. A520-A524. DOI: 10.1149/1.1362546.
10. **Brodnikovskyi, Y.** Properties of 10Sc1CeSZ-3.5 YSZ (33-, 40-, 50-wt.%) composite ceramics for SOFC application / Y. Brodnikovskyi, N. McDonald, I. Polishko et al. // Materials Today: Proceedings. – 2019. – V. 6. – I. 2. – P. 26-35. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.071.
11. **Agarkov, D.A.** Phase compositions, structures and properties of scandia-stabilized zirconia solid solution crystals co-doped with yttria or ytterbia and grown by directional melt crystallization / D.A. Agarkov, M.A. Borik, S.I. Bredikhin et al. // Solid State Ionics. – 2020. – V. 346. – Art. № 115218. – 7 p. DOI: 10.1016/j.ssi.2019.115218.
12. **Pasechnik, L.A.** Assessment of electrical conductivity and thermal expansion in scandium-zirconium ceramic directly derived from red mud / L.A. Pasechnik, D.I. Pereverzev, I.V. Shamsutov et al. // Inorganic Chemistry Communications. – 2025. – V. 176. – Art. №. 114227. – 8 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.114227.
13. **Wei, X.** Effect of doping $CeO_2$ and $Sc_2O_3$ on structure, thermal properties and sintering resistance of YSZ / X. Wei, G. Hou, Y. An et al. // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – I. 5. – P. 6875-6883. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.032.
14. **Gyrdasova, O.I.** Impact of formate precursor thermolysis route on the structure and photocatalytic activity of $Zr_{0.95}Sc_{0.05}O_{2-\delta}$ / O.I. Gyrdasova, E.V. Vladimirova, A.V. Dmitriev et al. // Inorganic Chemistry Communications. – 2026. – V. 184. – Art. №. 116007. – 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.116007.
15. **Гырдасова, О.И.** Формирование твердых растворов и композитов в системе ZnO-$ZrO_2$ / О.И. Гырдасова, Л.А. Пасечник // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 627-635. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.627.
16. **Zu, J.H.** Preparation and high-temperature performance of $Sc_2O_3$ –$Y_2O_3$ co-stabilized $ZrO_2$ thermal barrier coatings / J.H. Zu, Y. Gao, D. Liu et al. // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – I. 11. – P. 20460-20472. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.03.169.
17. **Fan, W.** Improved properties of scandia and yttria co-doped zirconia as a potential thermal barrier material for high temperature applications / W. Fan, Z.Z. Wang, Y. Bai et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – V. 38. – I. 13. – P. 4502-4511. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.002.
18. **Pasechnik, L.A**. Scandium modified zirconia extracted from red mud as a waste of alumina production / L.A. Pasechnik, I.S. Medyankina, D.I. Pereverzev, A.Y. Chufarov, A.Y. Suntsov // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2024. – V. 15. – I. 6. – P. 768-773. DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-6-768-773.
19. **Eichler, J.** Effect of grain size on mechanical properties of submicrometer 3Y-TZP: Fracture strength and hydrothermal degradation / J. Eichler, J. Rödel, U. Eisele, M. Hoffman // Journal of the American Ceramic Society. – 2007. – V. 90. – I. 9. – P. 2830-2836. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.01643.x.
20. **Komolikov, Y.I.** Stability of ceramics based on $ZrO_2$ Doped with $Y_2O_3$ under hydrothermal action / Y.I. Komolikov, I.D. Kashcheev, V.R. Khrustov, V. I. Pudov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – V. 61. – I. 4. – P. 424-427. DOI: 10.1007/s11148-020-00497-x.
21. **Chien, F.R.** Stress-induced martensitic transformation and ferroelastic deformation adjacent microhardness indents in tetragonal zirconia single crystals / F.R. Chien, F.J. Ubic, V. Prakash // Acta Materialia. – 1998. – V. 46. – I. 6. – P. 2151-2171. DOI: 10.1016/s1359-6454(97)00444-8.
22. **Borik, M.A.** Effect of the valence state of Ce ions on the phase stability and mechanical properties of the crystals of $ZrO_2$-based solid solutions / M.A. Borik, V.T. Bublik, R.M. Eremina et al. // Physics of the Solid State. – 2017. – V. 59. – I. 10. – P. 1934-1939. DOI: 10.1134/S1063783417100079.

**References:**

1. Wang F., Lyu Y., Chu D. et al. The electrolyte materials for SOFCs of low-intermediate temperature, *Materials Science and Technology*, 2019, vol. 35, issue 13, pp. 1551-1562. DOI: 10.1080/02670836.2019.1639008.
2. Hossain S., Abdalla A.M., Jamain S.N.B., Zaini J.H., Azad A.K. A review on proton conducting electrolytes for clean energy and intermediate temperature-solid oxide fuel cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 79, pp. 750-764. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.147.
3. *Perovskite materials: synthesis, characterisation, properties, and applications*, ed. by L. Pan, G. Zhu. IntechOpen, 2016, 650 p. DOI: 10.5772/60469.
4. Medvedev D., Brouzgou A., Demin A., Tsiakaras P. Proton-conducting electrolytes for solid oxide fuel cell

applications, *Advanced Medium and High Temperature Solid Oxide Fuel Cell Technology*, *CISM International Centre for Mechanical Sciences*, ed. by M. Boaro, A.A. Salvatore. Cham, Springer, 2017, vol. 574, pp. 77-118. DOI: 10.1007/978-3-319-46146-5_3.
5. Mahato N., Banerjee A., Gupta A., Omar S., Balani K. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review, *Progress in Materials Science*, 2015, vol. 72, pp. 141-337. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.001.
6. Medvedev D.A., Lyagaeva J.G., Gorbova E.V. et al. Advanced materials for SOFC application: strategies for the development of highly conductive and stable solid oxide proton electrolytes, *Progress in Materials Science*, 2016, vol. 75, pp. 38-79. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.08.001.
7. Mahato N., Gupta A., Balani K. Doped zirconia and ceria-based electrolytes for solid oxide fuel cells: a review, *Nanomaterials and Energy*, 2012, vol. 1, issue 1, pp. 27-45. DOI: 10.1680/NME.11.00004.
8. Shao Z., Tadé M.O. Application of SOFC Technology, *Intermediate-temperature solid oxide fuel cells. Materials and applications*, ed. by Z. Shao, M.O. Tadé. Berlin, Heidelberg, Springer, 2016. pp. 247-266. DOI: 10.1007/978-3-662-52936-2.
9. Arachi Y., Asai T., Yamamoto O. et al. Electrical conductivity of $ZrO_2$–$Sc_2O_3$ doped with $HfO_2$, $CeO_2$, and $Ga_2O_3$, *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, vol. 148, issue 5, pp. A520-A524. DOI: 10.1149/1.1362546.
10. Brodnikovskyi Y., McDonald N., Polishko I. et al. Properties of 10Sc1CeSZ-3.5 YSZ (33-, 40-, 50-wt.%) composite ceramics for SOFC application, *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 6, issue 2, pp. 26-35. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.071.
11. Agarkov D.A., Borik M.A., Bredikhin S.I. et al. Phase compositions, structures and properties of scandia-stabilized zirconia solid solution crystals co-doped with yttria or ytterbia and grown by directional melt crystallization, *Solid State Ionics*, 2020, vol. 346. art. no. 115218, 7 p. DOI: 10.1016/j.ssi.2019.115218.
12. Pasechnik L.A., Pereverzev D.I., Shamsutov I.V. et al. Assessment of electrical conductivity and thermal expansion in scandium-zirconium ceramic directly derived from red mud, *Inorganic Chemistry Communications*, 2025, vol. 176, art. no. 114227, 8 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.114227.
13. Wei X., Hou G., An Y. et al. Effect of doping $CeO_2$ and $Sc_2O_3$ on structure, thermal properties and sintering resistance of YSZ, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, issue 5, pp. 6875-6883. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.032.
14. Gyrdasova O.I., Vladimirova E.V., Dmitriev A.V. et al. Impact of formate precursor thermolysis route on the structure and photocatalytic activity of $Zr_{0.95}Sc_{0.05}O_{2-\delta}$, *Inorganic Chemistry Communications*, 2026, vol. 184, art. no. 116007, 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.116007.
15. Gyrdasova O.I., Pasechnik L.A. Formation of solid solutions and composites in the ZnO-$ZrO_2$ system [Formirovanie tverdyh rastvorov i kompozitov v sisteme ZnO-$ZrO_2$], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 627-635. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.627. (In Russian).
16. Zu J.H., Gao Y., Liu D. et al. Preparation and high-temperature performance of $Sc_2O_3$–$Y_2O_3$ co-stabilized $ZrO_2$ thermal barrier coatings, *Ceramics International*, 2024, vol. 50, issue 11, pp. 20460-20472. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.03.169.
17. Fan W., Wang Z.Z., Bai Y. et al. Improved properties of scandia and yttria co-doped zirconia as a potential thermal barrier material for high temperature applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, issue 13, pp. 4502-4511. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.002.
18. Pasechnik L.A., Medyankina I.S., Pereverzev D.I., Chufarov A.Y., Suntsov A.Y. Scandium modified zirconia extracted from red mud as a waste of alumina production, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2024, vol. 15, issue 6, pp. 768-773. DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-6-768-773.
19. Eichler J., Rödel J., Eisele U., Hoffman M. Effect of grain size on mechanical properties of submicrometer 3Y-TZP: fracture strength and hydrothermal degradation, *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, vol. 90, issue 9, pp. 2830-2836. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.01643.x.
20. Komolikov Y.I., Kashcheev I.D., Khrustov V.R., Pudov V.I. Stability of ceramics based on $ZrO_2$ Doped with $Y_2O_3$ under hydrothermal action, *Refractories and Industrial Ceramics*, 2020, vol. 61, issue 4, pp. 424-427. DOI: 10.1007/s11148-020-00497-x.
21. Chien F.R., Ubic F.J., Prakash V. Stress-induced martensitic transformation and ferroelastic deformation adjacent microhardness indents in tetragonal zirconia single crystals, *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, issue 6, pp. 2151-2171. DOI: 10.1016/s1359-6454(97)00444-8.
22. Borik M.A., Bublik V.T., Eremina R.M. et al. Effect of the valence state of Ce ions on the phase stability and mechanical properties of the crystals of $ZrO_2$-based solid solutions, *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, issue 10, pp. 1934-1939. DOI: 10.1134/S1063783417100079.