

УДК 54-11

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КСЕРОГЕЛЕЙ, ПОРОШКОВ И КЕРАМИКИ ИЗ ZrO_2

© 2024 г. Белоусова О. Л., Федоренко Н. Ю., Хамова Т. В.

*Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН,**Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2**e-mail: olgabelousova80@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.04.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 16.04.2024

Методом совместного осаждения гидроксидов из водных растворов азотнокислых солей циркония, иттрия, алюминия и церия водным раствором аммиака синтезированы ксерогели и порошки твердых растворов на основе диоксида циркония. Исследованы характеристики получаемых материалов. Проведена оценка влияния стабилизаторов и добавок на их синтез, спекание и свойства.

Ключевые слова: диоксид циркония, совместное осаждение, ксерогели, нанопорошки, рентгенофазовый анализ, низкотемпературная обработка, оксид алюминия.

DOI: 10.31857/S0132665124020101, EDN: QYFАНУ

Керамика на основе тетрагональной (t - ZrO_2) и кубической модификаций (c - ZrO_2) диоксида циркония обладает повышенной прочностью, твердостью, высокой трещиностойкостью, коррозионной стойкостью, устойчива к тепловому удару, а также сохраняет прочность при эксплуатации в широком диапазоне температур, благодаря чему находит широкое применение в качестве композиционных материалов, керамики, монокристаллов, пленочных покрытий, микроволокон и нанопорошков, материалов для медицины [1–7]. Несмотря на распространенность керамических материалов на основе диоксида циркония, а также высокую степень изученности их свойств, актуальным вопросом для современной науки остается влияние природы и количества добавок, стабилизирующих высокотемпературных модификаций диоксида циркония, придающих материалу необходимые свойства.

Стабилизация ZrO_2 в высокотемпературных модификациях зависит от вида стабилизатора, его количества, температуры обжига, количества примесей, содержащихся в диоксиде циркония, и других факторов.

Наиболее часто для стабилизации применяют оксид иттрия Y_2O_3 . Керамика на основе тетрагональной модификации диоксида циркония, стабилизированной оксидом иттрия, обладает уникально высокими прочностными свойствами, что делает ее подходящим материалом для трибологических систем [8]. Оксид церия также используется в качестве стабилизатора t - ZrO_2 . Выбор количества вводимой

добавки основывается на данных фазовой диаграммы [9, 10]. В работах количество было выбрано на основании данных фазовой диаграммы состояния системы $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2$ и составило 12 мол. %.

Известно, что введение в керамику на основе ZrO_2 добавки 20–35 мол. % оксида алюминия Al_2O_3 позволяет повысить вязкость ее разрушения и снизить эффект негативного влияния на нее жидких сред, в том числе и биологических [11, 12]. Кроме того, наличие Al_2O_3 способствует подавлению роста зерен диоксида циркония при спекании, что, в свою очередь, ведет к увеличению прочности материала за счет протекания процесса трансформационного упрочнения, характерного для наноразмерной керамики из $t\text{—ZrO}_2$.

Целью данной работы были синтез ксерогелей, порошков и керамики ряда составов в системах $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2$, $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ и изучение свойств полученных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза и исследования были выбраны составы $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$, $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$, $(\text{ZrO}_2)_{0.955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.045}$, 80 мол. % $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$ –20 мол. % Al_2O_3 , 80 мол. % $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ –20 мол. % Al_2O_3 . Синтез ксерогелей осуществляли методом совместного осаждения гидроксидов водным 1 М раствором аммиака (NH_4OH , pH 9–10) марки «ч.д.а.». В качестве исходных реактивов использовали водные растворы азотнокислых солей циркония ($\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) марки «ч.д.а.», иттрия ($\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) марки «ч.д.а.», церия ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) марки «ч.д.а.» и алюминия ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) марки «ч.д.а.».

Полное осаждение оксигидроксида циркония происходит при pH 4.2, гидроксида иттрия — при 7.0–7.4, гидроксида церия — при 9.8. В связи со значительным различием pH процесс осаждения гидроксидов в системах $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2$ проводили обратным методом. Полное осаждение гидроксида алюминия происходит при pH 5.2, при pH 7.8 начинается процесс растворения осадка вплоть до полного растворения при pH 10.8. Поэтому синтез составов в системах $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_3$ осуществляли в два параллельных этапа: совместное осаждение гидроксидов циркония и церия/циркония и иттрия проводили обратным методом, а осаждение гидроксида алюминия — прямым методом под контролем pH. После осаждения смеси гидроксидов циркония и церия/циркония и иттрия их осадки промывали декантацией до достижения значения pH раствора ~7.0, добавляли в каждую из смесей свежесозаженный гидроксид алюминия и перемешивали.

Во всех случаях полученные гелеобразные осадки фильтровали и подвергали низкотемпературной обработке при -25°C (24 ч) для снижения степени агломерации частиц за счет вымораживания кристаллизационной и адсорбированной воды [13], затем просушивали в сушильном шкафу SNOL при $120\text{—}150^\circ\text{C}$ и обжигали в электропечи SNOL на воздухе при температуре 600°C с выдержкой в течение 1 ч. Полученные порошки формовали сухим одноосным прессованием на гидравлическом прессе ППР-400 в стальной пресс-форме и спекали в камерной электропечи сопротивления ТК.5.6.1800.ДМ при 1350°C на воздухе с выдержкой в течение 2 ч в корундовых тиглях.

Термический анализ образцов ксерогелей осуществляли на дериватографе Q-1000 фирмы MOM. Измерения осуществляли в платиновых тиглях в воздушной атмосфере в интервале температур 20–1000°C со скоростью нагрева 5/мин.

Текстурные характеристики образцов полученных ксерогелей определяли методом тепловой десорбции азота с помощью анализатора сорбции газов Quantachrome Nova 4200e. Расчет площади удельной поверхности $S_{уд}$ проводили методом Брунауэра — Эммета — Теллера (БЭТ) по 10 точкам (относительная погрешность составляла 4%). Распределение пор по размерам определяли, основываясь на полученных изотермах десорбции азота, по методу Баррета — Джойнера — Халенда (БДХ). Расчеты проводили при помощи программного обеспечения NOVA Win-2.1. Тип поровой структуры и форму пор в образцах определяли по виду изотерм по классификации, предложенной С. Брунауэром, Л. Демингом, У. Демингом и Э. Теллером (БДДТ), и формам петель капиллярно-конденсационного гистерезиса, согласно IUPAC [14]

Расчет среднего размера частиц (d , нм) производили по формуле:

$$d = \frac{6}{S_{уд} \cdot \rho},$$

где ρ — плотность твердого тела, г/см³; $S_{уд}$ — удельная площадь поверхности, м²/г.

Средний размер гидродинамического диаметра (D) и седиментационную устойчивость (ζ -потенциал) частиц ксерогелей, полученных в работе, определяли методами динамического и электрофоретического рассеяния света с помощью анализатора NanoBrook 90 PlusZeta фирмы Brookhaven Instruments. Относительная погрешность определения составляла 8%. Для проведения данного исследования были приготовлены водные суспензии концентрацией 0.1 г/л, которые затем были подвергнуты ультразвуковой обработке в УЗ-ванне (240 Вт, 40 кГц) в течение 20 мин. Исследование полученных суспензий проводили после выдержки в течение ~1 ч.

Электронно-микроскопическое исследование ксерогелей, порошков и керамики проводили с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH.

Определение фазового состава полученных порошков и керамики проводили методом порошкового рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, режим работы рентгеновской трубки — 30 кВ, 10 мА, геометрия съемки — на отражение, позиционно-чувствительный детектор. Интервал углов $2\theta = 20^\circ$ – 60° ; шаг — 0.01° – 0.03° ; экспозиция в точке — 1–5 сек. Обработку дифрактограмм и расчет параметров элементарной ячейки проводили в программном комплексе PDWIN (НПО «Буревестник»). Фазовый состав образцов определяли с помощью международной базы порошковых рентгендифракционных данных ICDD (PDF-2). Средний размер кристаллитов (т.е. размер областей когерентного рассеяния) оценивали по профилю наиболее интенсивного рефлекса с использованием формулы Селякова — Шерера [15]:

$$d_{ОКР} = \frac{0,9 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta},$$

где $d_{\text{ОКР}}$ — размер области когерентного рассеяния (размер кристаллитов); θ — угол дифракции, λ — длина волны падающего излучения ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) $\text{CuK}\alpha$, β — ширина дифракционного рефлекса на его полувысоте, в градусах.

Характеристики спеченной керамики (открытая пористость, кажущаяся плотность) измеряли в соответствии с ГОСТ 473.4 [16] с применением метода гидростатического взвешивания на лабораторных аналитических весах ВЛР-200 г. Для более полного насыщения водой образцы подвергали вакуумированию в течение 60 минут (остаточное давление составляло 133 Па). Линейную усадку ($Y_{\text{лин.}}, \%$) спеченной керамики определяли по формуле:

$$Y_{\text{лин.}} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100\%,$$

где L_0 — начальное расстояние между нанесенными на отформованном образце метками, мм; L_1 — расстояние между нанесенными метками на спеченном образце, мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным результатам исследования текстурных характеристик всех полученных ксерогелей, вид сорбционных кривых соответствует IV типу по классификации БДТ и свидетельствует о мезопористой структуре всех образцов (рис. 1). Капиллярно-конденсационный гистерезис при этом выражен отчетливо, соответствует типу H4 по классификации IUPAC и свидетельствует о наличии щелевидных пор. Наименьшим значением площади удельной поверхности и самым высоким размером частиц обладает ксерогель $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$. Увеличение содержания в составе оксида иттрия приводит к значительному уменьшению размеров частиц ксерогеля и площади удельной поверхности. При этом склонность к агломерации резко возрастает и ксерогель образует неустойчивую суспензию (ζ -потенциал стремится к нулю), содержащую прочные агломераты крупного размера (до 1227 нм), не поддающиеся разрушению при помощи ультразвуковой обработки (табл. 1).

По результатам РФА установлено, что после обжига при 600°C в полученных из ксерогелей порошках составов $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$, 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ –20 мол.% Al_2O_3 , 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ –20 мол.% Al_2O_3 образуется псевдокубический твердый раствор t' - ZrO_2 , со средним размером ОКР 9–11 нм. Дальнейшее повышение температуры до 1350°C приводит

Таблица 1. Текстурные характеристики и коллоидные свойства ксерогелей, полученных методом соосаждения с последующей низкотемпературной обработкой осадков

Состав	Площадь удельной поверхности $S_{\text{уд}} \pm 5\%, \text{ м}^2/\text{г}$	Средний размер частиц, нм	Гидродинамический диаметр D , нм
$(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$	389,3	2,7	$251,1 \pm 1,6$
$(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$	120,4	8,3	$549,97 \pm 4,22$
$(\text{ZrO}_2)_{0,955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,045}$	409,5	3,0	$1227,3 \pm 65,1$
80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ –20 мол.% Al_2O_3	399,21	2,5	$519,10 \pm 6,14$
80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ –20 мол.% Al_2O_3	238,0	1,38	$258,66 \pm 7,68$

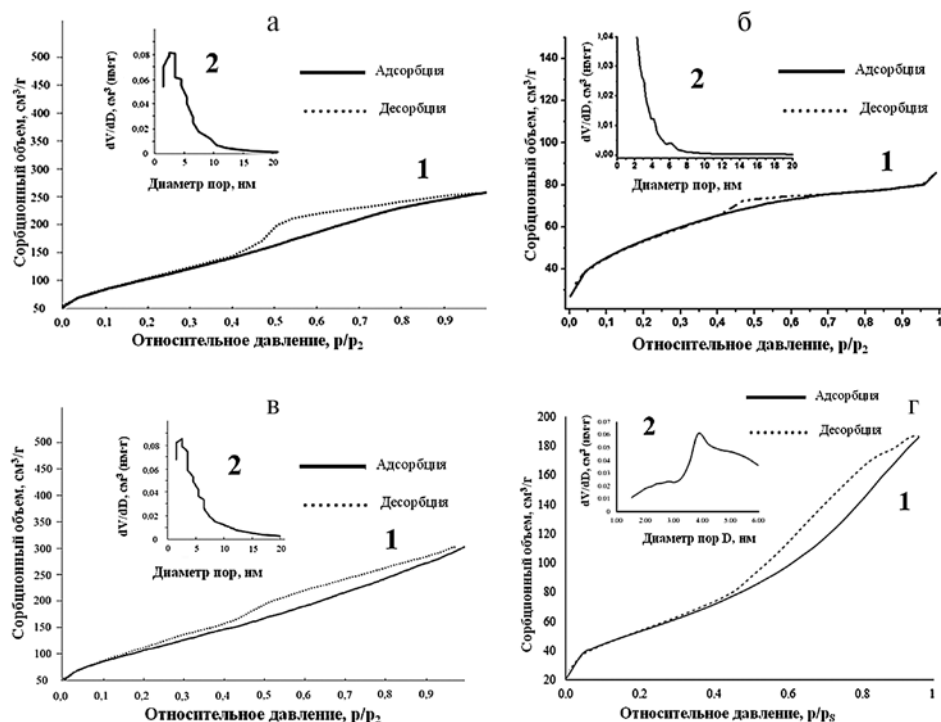


Рис. 1. Изотермы адсорбции-десорбции (1) и дифференциальные кривые распределения пор по размерам (2) для ксерогелей составов $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ (а), $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$ (б), $(\text{ZrO}_2)_{0.955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.045}$ (в), 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ –20 мол.% Al_2O_3 (г).

к образованию в них тетрагонального твердого раствора $t\text{-ZrO}_2$, но в составе 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ –20 мол.% Al_2O_3 также присутствует небольшое количество моноклинного диоксида циркония. Порошки $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$, $(\text{ZrO}_2)_{0.955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.045}$ содержат только кубическую фазу, которая остается неизменной после высокотемпературной обработки.

На термограммах всех полученных ксерогелей в интервале температур 100–170°C присутствуют эндоэффекты, соответствующие основной стадии дегидратации осадков, потери массы составляют от 10 до 15% (рис. 2). Такое незначительное уменьшение массы связано с тем, что предварительное вымораживание воды в соосажденных гелях снижает ее количество в кристаллогидратах аморфных гидроксидов, что приводит к увеличению дисперсности порошков и облегчает дегидратацию в процессе сушки осадков [13]. Узкий экзоэффект при 435°C для состава $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$ указывает на «взрывной» характер кристаллизации диоксида циркония (рис. 2, а).

Экзотермические эффекты при температурах 426–442°C соответствуют началу процесса кристаллизации псевдокубического твердого раствора $t'\text{-ZrO}_2$ (рис. 2, а, в, д). Экзотермический эффект для состава 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ –20 мол.% Al_2O_3 при температуре 755°C (рис. 2, д) соответствует кристаллизации тетрагонального твердого раствора на основе диоксида циркония $t\text{-ZrO}_2$ [17]. В случае состава 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$ –20 мол.% Al_2O_3 экзоэффект при 610°C указывает на протекание процесса кристаллизации $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Уширенный экзоэффект при 840°C свидетельствует о фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2, в). Однако данный эффект может быть также обусловлен началом распада неравновесного твердого раствора $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3)$ [18,19].

Электронно-микроскопическое исследование порошка состава $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ показало, что он состоит из мелких частиц неправильной формы со средним размером 30 нм, агломераты имеют размер от 80 до 220 нм (рис. 3, а) [20]. Порошок 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ —20 мол.% Al_2O_3 состоит из более мелких частиц со средним размером 20 нм. Размеры агломератов также меньше, чем в порошке состава $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$, и лежат в более узком интервале — 50–100 нм (рис. 3, б).

Порошки $(\text{ZrO}_2)_{0,955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,045}$ (рис. 4, а) и $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ (рис. 4, б) характеризуются низким распределением частиц по размерам и правильной формой. Агломераты практически не превышают 100 мкм, что является результатом предварительной заморозки ксерогелей, способствующей уменьшению степени агломерации.

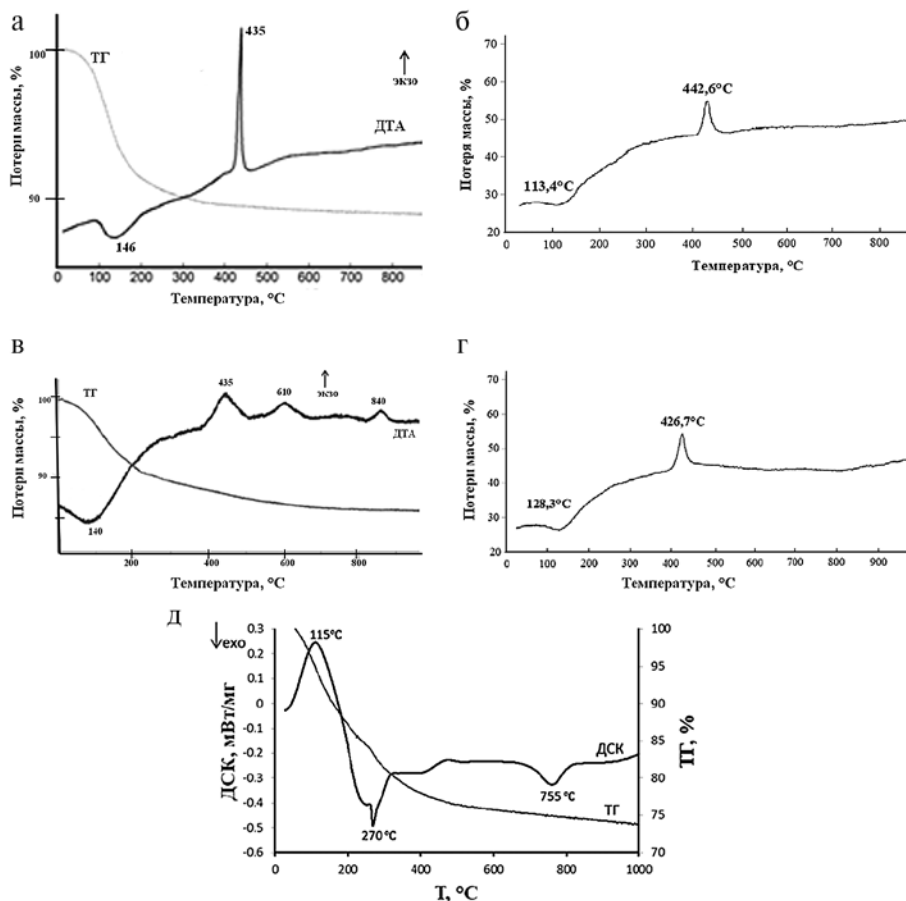


Рис. 2. Результаты дифференциально-термического анализа ксерогелей составов $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ (а), $(\text{ZrO}_2)_{0,955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,045}$ (б), 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ —20 мол.% Al_2O_3 (в), $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ (г) и дифференциальной сканирующей калориметрии состава 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ —20 мол.% Al_2O_3 (д).

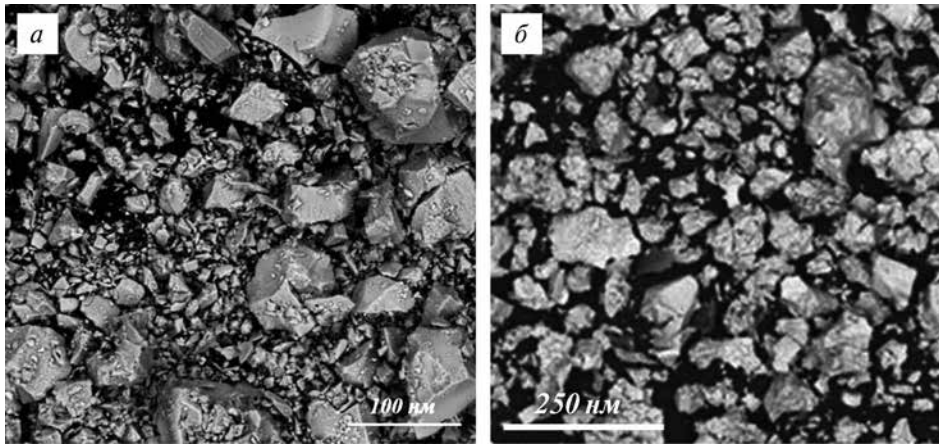


Рис. 3. Микрофотографии порошков состава $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ (а) и 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ –20 мол.% Al_2O_3 (б).

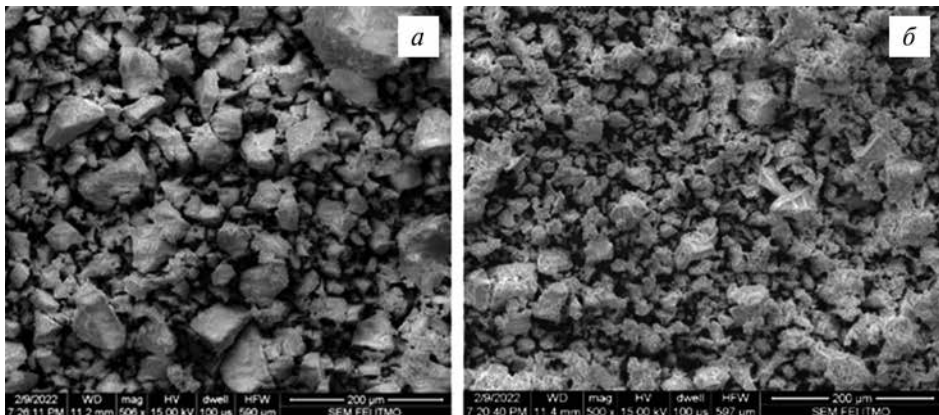


Рис. 4. Микрофотографии порошков состава $(\text{ZrO}_2)_{0,955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,045}$ (а) и $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ (б).

Таблица 2. Свойства керамических образцов, спеченных при 1600°C (2 ч)

Состав	Кажущаяся плотность *, $\rho_{\text{каж}}$ (г/см ³)	Открытая пористость *, Р (%)	Линейная усадка *, $Y_{\text{лин}}$ (%)
$(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$	6,07	2,10	21,33
$(\text{ZrO}_2)_{0,955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,045}$	5,25	12,92	20,00
$(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$		15	
80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ –20 мол.% Al_2O_3		15,03	
80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0,88}(\text{CeO}_2)_{0,12}$ –20 мол.% Al_2O_3	5,24	8,01	27,9

*Погрешность определения — 5%.

Текстурные характеристики керамических образцов, отожженных при 1350°C, представлены в табл. 2. Керамика, обладающая самой высокой кажущейся плотностью и минимальной пористостью среди всех исследованных материалов, была получена в системе $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2$. Введение в ее состав оксида алюминия приводит к уменьшению плотности и значительному увеличению открытой пористости, хотя размер частиц ксерогеля и порошка состава 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$ —20 мол.% Al_2O_3 почти вдвое меньше, чем у состава $(\text{ZrO}_2)_{0.88}(\text{CeO}_2)_{0.12}$. Наиболее пористая керамика была получена из порошка состава 80 мол.% $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$ —20 мол.% Al_2O_3 . Следует отметить, что в этом случае Al_2O_3 в составе исходного ксерогеля приводит к увеличению площади удельной поверхности почти в 4 раза по сравнению с $(\text{ZrO}_2)_{0.97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.03}$. Причиной такого поведения может быть недостаточная температура обжига керамического материала в присутствии в его составе оксида алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение содержания оксида иттрия в составе в системе $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$ приводит к стабилизации кубического твердого раствора уже при 600°C и сохранении его при более высоких температурах. Но высокая склонность к агломерации ксерогеля $(\text{ZrO}_2)_{0.955}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.045}$ препятствует в дальнейшем получению плотной керамики с минимальной пористостью. Оксид алюминия, введенный в составы как системы $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$, так и $\text{ZrO}_2\text{—CeO}_2$, стабилизирует тетрагональный твердый раствор диоксида циркония и позволяет синтезировать ксерогели с минимальными размерами частиц и большой площадью удельной поверхности, что в дальнейшем должно позволить получать плотные керамические материалы $t\text{-ZrO}_2$ при изменении условий их спекания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ларисе Николаевне Ефимовой за помощь в проведении термических исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы НИР НИЦ КИ 1023033000122-7-1.4.3 «Физико-химические основы неорганического синтеза микро- и наноструктурированных неорганических, органо-неорганических и керамических материалов и покрытий для био-, энерго- и ресурсосберегающих технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигачев А. О., Головин Ю. И., Умрихин А. В. и др. Мир материалов и технологий. Керамические материалы на основе диоксида циркония / Под общ. ред. Ю. И. Головина. М.: Техносфера, 2018. 358 с.
2. Кораблева Е. А., Майзик М. А., Харитонов Д. В. Керамические материалы и изделия на основе ZrO_2 для различного применения в металлургической промышленности // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2—2. С. 651—654.
3. Буякова С. П., Хлусов И. А., Кульков С. Н. Пористая циркониевая керамика для эндопротезирования костной ткани // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. № 2. С. 127—130.

4. Федоров П. П., Яроцкая Е. Г. Диоксид циркония: Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. Т. 23. № 2. С. 169–187.
5. Кабалов Е. Н., Гращенков Д. В., Исаева Н. В., Солнцев С. С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. 1. № 54. С. 20–24.
6. Примаченко В. В., Мартыненко В. В., Шулик И. Г., Кущенко И. А. Высокоогнеупорные тигли из стабилизированного диоксида циркония для индукционной плавки металлов платиновой группы, изготовленные методом вибролитья // Литье и металлургия. 2012. Т. 3. № 67. С. 166–168.
7. Зимичев А. М., Соловьева Е. П. Волокно диоксида циркония для высокотемпературного применения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 51–61.
8. Clarke I. C. et al. Current Status of Zirconia used in Total Hip Implants // J. Bone Joint Surg. Ser. A. 2003. Vol. 85. P. 73–84.
9. Podzorova L. I., Il'icheva A. A., Mikhailina N. A. Effect of Preparation Conditions on the Phase Composition of $\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CeO}_2$ Powders // Neorg. Mater. 2002. № 12. P. 1455–1461.
10. Podzorova L. I., Il'icheva A. A., Mikhailina N. A., Shevchenko V. Ya. Effect of Synthesis Conditions on the Phase Composition of $\text{ZrO}_2\text{--CeO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ Sol–Gel Powders // Neorg. Mater. 2001. № 1. P. 60–66.
11. Tsubakino H., Nozato R., Hamamoto M. Effect of Alumina Addition on the Tetragonal-to-Monoclinic Phase Transformation in Zirconia — 3 mol.% Ytria // J. Am. Ceram. Soc. 1991. № 74 (2). P. 440–443.
12. Li J.–F., Watanabe R. Fracture Toughness of Al_2O_3 — Particle Dispersed Y_2O_3 — Partially Stabilized Zirconia // J. Am. Ceram. Soc. 1995. № 78 (4). P. 1079–1082.
13. Morozova L. V., Kalinina M. V., Koval'ko N. Yu. et al. Preparation of Zirconia-Based Nanoceramics with a High Degree of Tetragonality // Glass Physics and Chemistry. 2014. Vol. 40. № 3. P. 352–355.
14. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость // Пер. с англ., 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.
15. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н. и др. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.
16. ГОСТ 473.4–81 Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кажущейся плотности и кажущейся пористости. Взамен ГОСТ 473.4–72; введ. 1981-01-07. М.: Издательство стандартов, 1981. 2 с.
17. Yashima M., Mitsuhashi T., Takashina H. et al. Tetragonal-Monoclinic Phase Transition Enthalpy and Temperature of $\text{ZrO}_2\text{--CeO}_2$ Solid Solutions // Journal of the American Ceramic Society. 1995. Vol. 78. № 8. P. 2225–2228.
18. Королев П. В., Князев А. В., Гаврилов И. Р. и др. Рентгеновское и калориметрическое исследование порошковых нанокристаллических систем на основе ZrO_2 (Y) и Al_2O_3 со вторым нерастворимым компонентом // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. Вып. 2. С. 252–257.
19. Жарныльская А. Л., Вольхин В. В., Роутер Х. Влияние природы анионов солей алюминия, применяемых для синтеза прекурсора керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$, на стабилизацию тетрагональной модификации диоксида циркония // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. Вып. 8. С. 1268–1272.
20. Морозова Л. В., Калинина М. В., Ковалько Н. Ю. и др. Синтез и исследование нанокомпозиций на основе диоксида циркония с целью создания новых биоматериалов // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № 6S. С. 346–352.