

Научная статья

УДК 541.182

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-32-41

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗОЛЕЙ ОКСИДА ИТТРИЯ

Ю.Е. Лебедева¹, А.С. Чайникова¹, Н.Е. Щеголева¹, И.О. Беляченков¹, М.В. Турченко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Синтезированы золи оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе). Проведено исследование структуры и свойств золей: размера и морфологии частиц, ζ -потенциала. По результатам исследования методом фотонной корреляционной спектроскопии определено распределение размеров частиц в золях. Средний размер частиц для золь с содержанием оксида иттрия 1 % (по массе) составил 49,3 нм; 5 % (по массе): 67 нм и 10 % (по массе): 232 нм. По результатам исследования методом рентгенофлуоресцентного анализа средний размер кристаллитов нанопорошка оксида иттрия составил 38,5 нм, что коррелирует с результатами исследования методом просвечивающей электронной микроскопии: 30–50 нм. С повышением концентрации оксида иттрия ζ -потенциал золей увеличивается с $-0,14$ до $-3,21$ мВ, однако является достаточно небольшим и свидетельствует о низкой агрегативной устойчивости золей.

Ключевые слова: оксид иттрия, золь, керамические материалы, спекание, золь-гель метод, фазообразование

Для цитирования: Лебедева Ю.Е., Чайникова А.С., Щеголева Н.Е., Беляченков И.О., Турченко М.В. Синтез и исследование свойств золей оксида иттрия // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-32-41.

Scientific article

SYNTHESIS AND STUDY OF THE PROPERTIES OF YTTRIUM OXIDE SOLS

Yu.E. Lebedeva¹, A.S. Chainikova¹, N.E. Shchegoleva¹, I.O. Belyachenkov¹, M.V. Turchenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Sols of yttrium oxide with a Y_2O_3 content of 1, 5, and 10 wt. % have been synthesized. The structure and properties of sols have been studied: particle size and morphology, ζ -potential. According to the results of the study by photon correlation spectroscopy, the distribution of particle sizes in sols was determined: the average particle size was 49.3 nm for a sol with a Y_2O_3 content of 1 wt. %, 67 nm for a sol with a Y_2O_3 content of 5 wt. % and 232 nm for a sol with a Y_2O_3 content 10 wt. %. According to the results of XRD studies, the average size of crystallites of yttrium oxide nanopowder was 38.5 nm, which correlates with the results of the TEM study – 30–50 nm. The ζ -potential of the sols decreases with an increase in the concentration of yttrium oxide from -0.14 mV to -3.21 mV, however, it is quite small and indicates a low aggregative stability of the sols.

Keywords: yttrium oxide, sol, ceramic materials, sintering, sol-gel method, phase formation

For citation: Lebedeva Yu.E., Chainikova A.S., Shchegoleva N.E., Belyachenkov I.O., Turchenko M.V. Synthesis and study of the properties of yttrium oxide sols. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-32-41.

Введение

Соединения иттрия могут использоваться в различных областях промышленности. Так, например, бориды, сульфиды и оксиды иттрия служат материалом для производства катодов мощных генераторных установок, тиглей для плавления тугоплавких металлов [1, 2]. Муллитовая керамика, обладая хорошими электрофизическими свойствами и рядом ценных физико-технических свойств (таких как высокие тугоплавкость и термостойкость, сравнительно низкий температурный коэффициент линейного расширения, повышенная химическая стойкость), находит широкое применение в технике. Однако получение плотной мелкокристаллической муллитовой керамики без добавок по обычной технологии затруднено из-за сравнительно высокой температуры синтеза муллита (~ 1450 °C) и последующего обжига изделий (~ 1750 °C), а также из-за низкой активности получаемых порошков вследствие их существенной рекристаллизации. Введение всего 1 % (по массе) оксида иттрия (Y_2O_3) способствует улучшению спекаемости муллитовых порошков, особенно при низких температурах (1400–1500 °C). Это позволяет получать такую же плотность керамики при температуре на 100–150 °C меньше, которую имеют образцы без добавок, обожженные при 1630 °C [3]. Одним из возможных вариантов применения оксида иттрия является его использование в качестве стабилизирующей добавки при получении мелкозернистой циркониевой керамики – например, жаропрочного материала циттрит, обладающего значительной твердостью, высокой температурой плавления, низкой упругостью пара и малой химической активностью. Все эти свойства реализуются при искажении решетки моноклинного диоксида циркония посредством введения в состав керамики другого оксида-модификатора (стабилизирующего оксида). Для стабилизации оксида циркония хорошо подходят ионы Y^{3+} и Yb^{3+} . Система $ZrO_2-Y_2O_3$ часто применяется в технологии твердых электролитов и нагревательных элементов из оксида циркония (ZrO_2). Это связано с тем, что кубические твердые растворы оксидов Y_2O_3 и ZrO_2 обладают наибольшей стабильностью свойств в области как низких, так и высоких температур. Так, материал циттрит обладает минимальной теплопроводностью и сохраняет свои свойства до высоких температур (>1600 °C). Он зарекомендовал себя в качестве абразивов, может применяться в износо- и коррозионностойком режущем инструменте, уплотнителях и подшипниках, высокотемпературных огнеупорах и сверхпроводниках, защитных керамических покрытиях, кислородных сенсорах для автомобильных двигателей и искусственных драгоценных камнях [4]. Известен также другой керамический материал – иттрийлокс (это твердый раствор системы $Y_2O_3-Th_2O_4$), который для видимой части спектра прозрачен, как стекло, и, кроме того, хорошо пропускает инфракрасные лучи. Из него изготавливают смотровые глазки высокотемпературных печей [5]. Прозрачная керамика из оксида иттрия обладает высоким светопропусканием в видимой и инфракрасной (ИК) области спектра, повышенной температурой плавления и термостойкостью, а также имеет высокие механические и электрофизические свойства. Соединения иттрия широко используются при производстве кинескопов (красные люминофоры характеризуются высокой яркостью свечения). В Японии для этой цели применяют $Y_2O_3:Eu^{3+}$, специалисты других стран отдают предпочтение ортованадату иттрия (YVO_4) [6]. Люминофор на основе оксида иттрия, активированный 4–5 % (мольн.) европия, хорошо известен в качестве источника красной составляющей спектра излучения и нашел широкое применение в электронно-лучевых трубках, дисплеях, различных люминесцентных устройствах [7].

Высокий интерес к нанопорошкам оксида иттрия связан с тем, что они являются исходным материалом при спекании оптической керамики – перспективного материала для твердотельных лазеров [8].

Кислородсодержащие соединения иттрия чаще всего применяются как модифицирующие или стабилизирующие добавки: при модифицировании, спекании и стабилизации керамики. Для достижения равномерного распределения в композициях таких

добавок их целесообразно вводить в высокодисперсном виде, например в виде золь [9–13]. Гидрозоли оксидов и гидроксидов относят к лиофобным дисперсным системам с лиофилизированной межфазной поверхностью. По сравнению с большинством лиофобных систем они имеют относительно невысокое межфазное натяжение, которое, однако, не столь низкое, чтобы они образовались самопроизвольно. В отличие от лиофильных дисперсных систем гидрозоли гидроксидов могут быть агрегативно устойчивыми лишь кинетически и коагулируют в определенных условиях. Их устойчивость к коагуляции (как и других лиофобных систем) с водной дисперсионной средой в значительной степени определяется электростатическим фактором, действие которого зависит от электроповерхностных свойств частиц, ионной силы и pH дисперсионной среды. В то же время агрегативная устойчивость гидрозолей оксидов и гидроксидов во многих случаях обусловлена действием и других факторов – неэлектростатической природы. Существенное значение в гидрофилизации поверхности частиц и, соответственно, стабилизации таких систем может иметь образование поверхностных полимолекулярных слоев из ориентированных определенным образом диполей воды. Таким же образом на агрегативную устойчивость гидрозолей оксидов и гидроксидов может влиять наличие на поверхности их частиц ионизированных гель-слоев, имеющих довольно большую толщину. Для гидрозолей оксидов и гидроксидов характерны изменения величины и знака заряда поверхности частиц при увеличении или уменьшении pH дисперсионной среды. В результате этого изменяется влияние сил электростатического отталкивания на взаимодействие частиц, соответственно, изменяется и их устойчивость к агрегации. Для каждого золя существует определенная область значений pH среды, в которой он не коагулирует. Диапазон значений pH-устойчивости для разных гидрозолей оксидов, гидроксидов и оксогидроксидов может варьироваться от нескольких десятых долей до нескольких единиц значений pH дисперсионной среды. Частицы в гидрозолях оксидов ZrO_2 , SiO_2 , TiO и в смешанных золях системы CeO_2-ZrO_2 не агрегируют в довольно широкой области значений pH среды. Для гидрозолей оксидов CuO , CeO_2 и $AlOOH$, а также для золь оксидов ZnO_2 и $EuOOH$ область агрегативной pH-устойчивости находится в более узком диапазоне значений pH дисперсионной среды [14].

Золь оксида иттрия перспективен для применения в качестве спекающей добавки при получении керамики, в качестве стабилизатора керамики на основе оксида циркония, а также для производства термоупрочненной глиноземной и другой керамики [15–20].

Цель данной работы – синтез золь с разной концентрацией нанопорошка оксида иттрия (1, 5 и 10 % (по массе)) и исследование их структуры и свойств (стабильности, размера и морфологии частиц, ζ -потенциала).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [21].

Материалы и методы

В данном исследовании в качестве исходных компонентов для приготовления золь оксида иттрия с содержанием нанопорошка Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе) использовали нанопорошок оксида иттрия китайского производства, дистиллированную воду и органическую кислоту.

Золи готовили путем последовательного добавления компонентов с применением магнитной мешалки.

Приготовленные золи исследовали методами ИК-спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и рентгенофазового анализа (РФА). Исследование структуры нанопорошка оксида иттрия проводили с применением светлопольных и темнопольных методик на просвечивающем электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 200 кВ. Рентгеноструктурный анализ нанопорошка и зольей оксида иттрия выполнен с применением дифрактометра, в монохроматическом излучении $\text{Cu } K_{\alpha}$, в диапазоне углов 2θ от 10 до 130 градусов и с выдержкой 30 с. Расшифровка дифрактограмм проведена с использованием программного обеспечения. Определение размера частиц и ζ -потенциала зольей оксида иттрия проводили на анализаторе размера частиц, принцип работы которого основан на методе статического и динамического рассеяния света (фотонной корреляционной спектроскопии). Размер диспергированных в жидкости частиц и молекулярную массу полимерных молекул определяли измерением корреляционной функции флуктуаций интенсивности рассеянного света и интегральной интенсивности рассеяния. Принцип измерения ζ -потенциала основан на методе динамического рассеяния света в режиме измерения скорости потока (в режиме лазерного доплеровского анемометра). Измерения проводили при мощности лазера 2–5 мВ.

Результаты и обсуждение

Структуру нанопорошка оксида иттрия исследовали методами РФА и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис. 1 и 2).

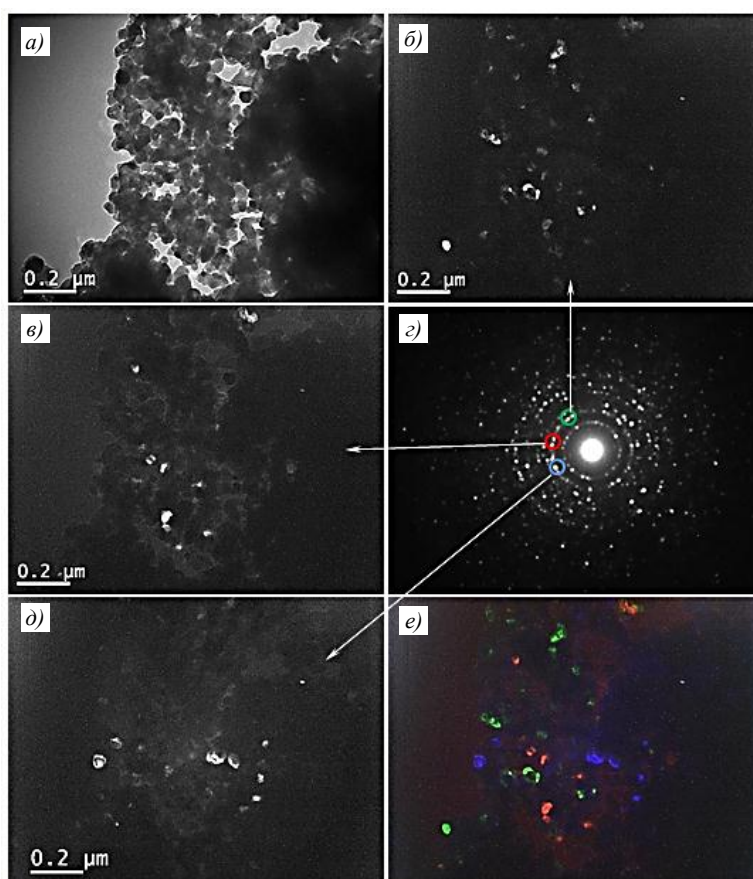


Рис. 1. Результаты исследования структуры нанопорошка оксида иттрия, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии: *a* – светлопольный снимок; *б*, *в*, *д* – темнопольные снимки в различных фрагментах одного из колец, сформированных при дифракции электронов на частицах нанопорошка; *е* – совмещенная (в каналах красного, зеленого и синего цвета) картина трех темнопольных снимков (*б*, *в*, *д*); *з* – дифракционная картина

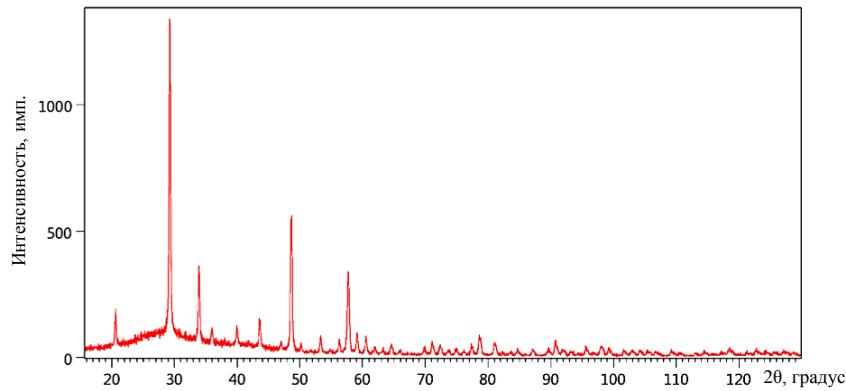
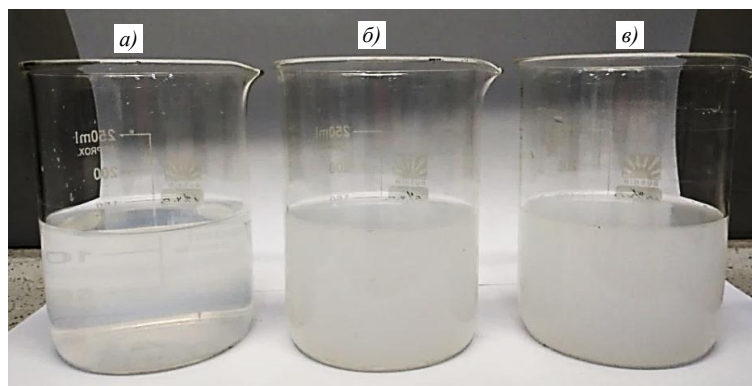


Рис. 2. Дифрактограмма нанопорошка оксида иттрия

На темнопольных снимках видны отдельные частицы размером $\sim(30\text{--}50)$ нм. Следует учитывать, что на дифракции могут появляться рефлексы в результате двойного брэгговского отражения (когда дифрагированные на одной частице электроны претерпевают повторную дифракцию на кристаллических плоскостях второй частицы). Такое обычно наблюдается на перекрывающихся частицах с «удачной» ориентировкой, т. е. некоторые светлые участки на темных полях могут быть не самими частицами, а областями их перекрытия. По результатам РФА средний размер кристаллитов нанопорошка оксида иттрия составляет 38,5 нм.

На рис. 3 представлена фотография синтезированных золей оксида иттрия с концентрацией нанопорошка Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе). Значение pH золей составило 7,1–7,5.

Рис. 3. Фотография золей оксида иттрия с концентрацией нанопорошка Y_2O_3 в количестве 1 (а), 5 (б) и 10 % (по массе) (в)

Устойчивость полученных золей определяли визуально: потерей устойчивости считалось осаждение частиц (образование осадка), гелеобразование и расслоение. Устойчивость золя оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе) составила 97, 75 и 68 дней соответственно.

Методом фотонной корреляционной спектроскопии определяли распределение частиц по размерам в золях (рис. 4). Для золя с содержанием оксида иттрия 1 % (по массе) количество частиц размером 49,3 нм составило 75 %, размером 471 нм: 25 %; с содержанием 5 % (по массе) количество частиц размером 39 нм составило 17 %, размером 95 нм: 83 %; с содержанием 10 % (по массе) количество частиц размером 86,9 и 377 нм составило по 70 %. С повышением концентрации нанопорошка оксида иттрия средний размер частиц в золях увеличивается, что, по-видимому, связано с их агрегацией. По результатам РФА размер частиц золей составил 36,7 нм.

Методом динамического рассеяния света в режиме измерения скорости потока (в режиме лазерного доплеровского анемометра) определяли ζ -потенциал золей. С повышением концентрации оксида иттрия значения ζ -потенциала золей увеличиваются:

| Концентрация оксида иттрия, % (по массе) | ζ -потенциал, мВ |
|--|----------------------------------|
| 1 | $(-0,14 \pm 1,76) \cdot 10^{-3}$ |
| 5 | $(-2,31 \pm 2,3) \cdot 10^{-2}$ |
| 10 | $(-3,21 \pm 3,18) \cdot 10^{-2}$ |

Чем больше указанная величина, тем более агрегативно устойчив золь. В данном случае ζ -потенциал золей достаточно низкий, что коррелирует с их невысокой агрегативной устойчивостью (68–97 дней).

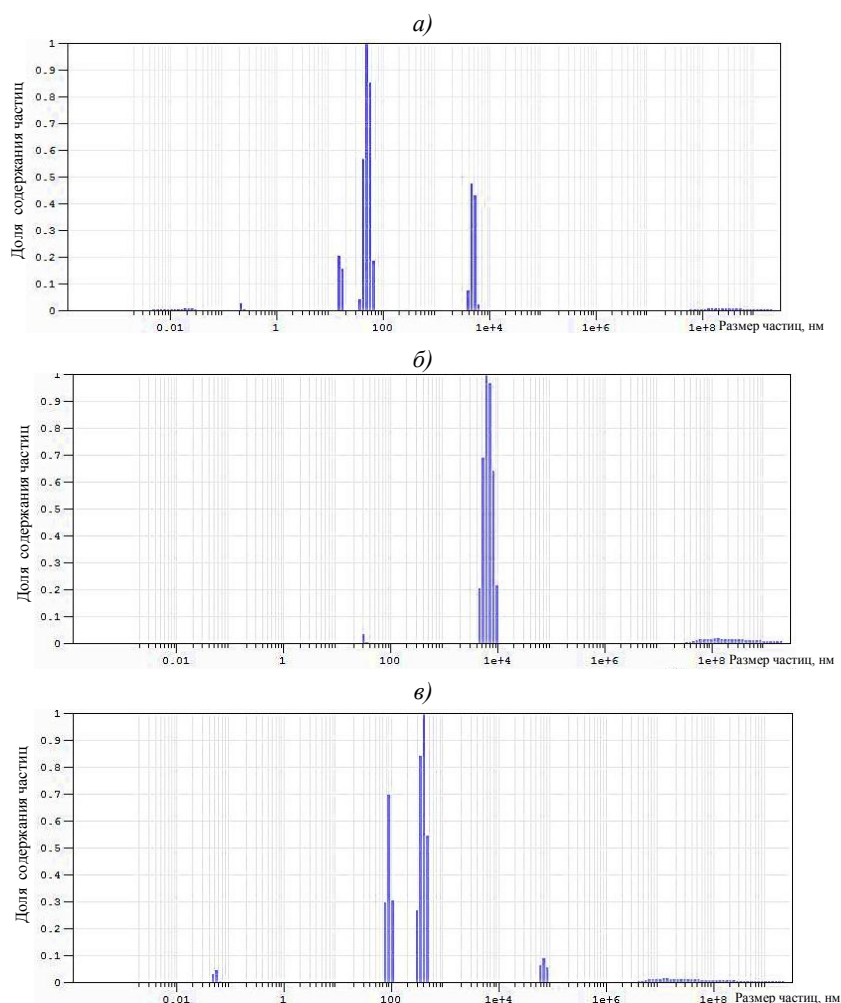


Рис. 4. Гистограммы распределения частиц по размерам в золях оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1 (а), 5 (б) и 10 % (по массе) (в)

Проведено исследование золей оксида иттрия методом ДСК в интервале температур 20–400 °С. На рис. 5 представлены кривые, полученные данным методом, для золей с концентрацией Y_2O_3 в количестве 1 и 5 % (по массе), а также для высушенного золя с концентрацией Y_2O_3 10 % (по массе). Эндотермические пики при температуре 118–120 °С соответствуют удалению воды. Для высушенного золя с концентрацией оксида иттрия 10 % (по массе) данный пик практически сглажен.

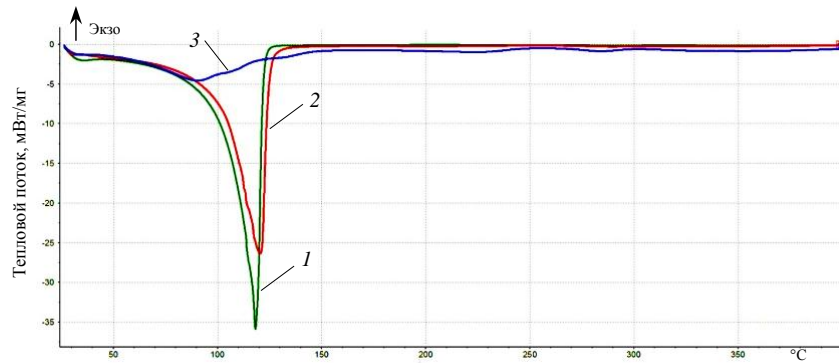


Рис. 5. Результаты исследования (выполненного методом дифференциальной сканирующей калориметрии) зольей оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1 (1), 5 (2) и 10 % (по массе) (3)

Золи оксида иттрия также исследовали методом ИК-спектроскопии (рис. 6). Для зольей с содержанием оксида иттрия 1 и 5 % (по массе) снимали ИК-спектры в жидком состоянии, а с содержанием 10 % (по массе) – в высушенном состоянии. Широкая полоса поглощения при частоте колебаний $3000\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ обусловлена антисимметричными и симметричными валентными колебаниями связи OH^- . Деформационным колебаниям воды соответствуют выраженные при частоте колебаний $1556\text{--}1642\text{ см}^{-1}$ пики. Полоса поглощения при частоте колебаний $1450\text{--}1451\text{ см}^{-1}$ относится к деформационным колебаниям углеводородной группы органической кислоты. Полосы поглощения при частоте колебаний $605,5\text{--}610$; $661,1$ и $691,2\text{--}694,5\text{ см}^{-1}$ соответствуют полосам поглощения связи $Y\text{--}O\text{--}Y$ и для связи $\text{--}C=O$ органической кислоты. Для золя с содержанием оксида иттрия 10 % (по массе) также характерна низкоинтенсивная полоса поглощения при частоте колебаний 1022 см^{-1} , обусловленная образованием на поверхности частиц карбонатов и соответствующая колебаниям CO_3^{2-} -групп.

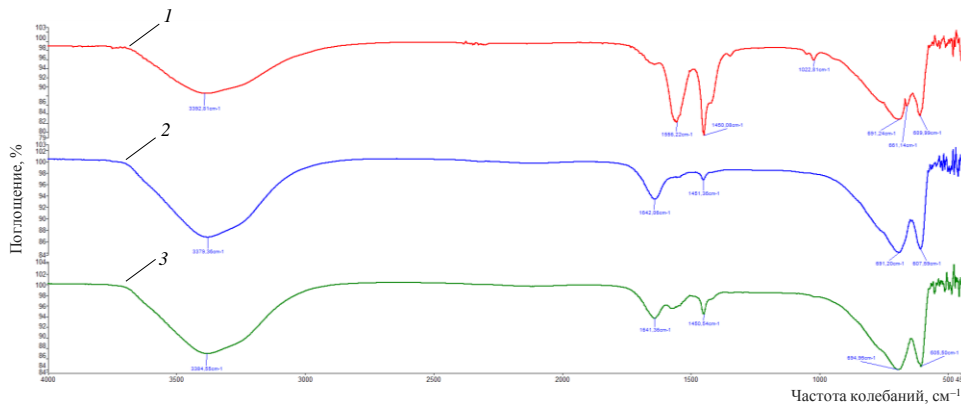


Рис. 6. Результаты ИК-спектроскопии зольей оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1 (1), 5 (2) и 10 % (по массе) (3)

Синтезированные золи оксида иттрия с содержанием Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе) имеют достаточно небольшой размер частиц, что делает их перспективными для применения в качестве спекающей добавки при получении керамических материалов, а также для стабилизации оксида циркония. Однако при этом следует учитывать их невысокую агрегативную устойчивость, подтверждающуюся небольшой величиной ζ -потенциала.

Заключения

Синтезированы золи оксида иттрия с концентрацией нанопорошка Y_2O_3 в количестве 1, 5 и 10 % (по массе), устойчивость которых составила 97, 75 и 68 дней соответственно; величина рН зольей составила 7,1–7,5.

Определено распределение частиц по размерам в золях. Для золя с содержанием оксида иттрия 1 % (по массе) количество частиц размером 49,3 нм составило 75 %, а размером 471 нм: 25 %; с содержанием 5 % (по массе) количество частиц размером 39 нм составило 17 %, а размером 95 нм: 83 %; с содержанием 10 % (по массе) количество частиц размером 86,9 и 377 нм составило по 70 %. По результатам РФА размер частиц зольей составил 36,7 нм.

С повышением концентрации оксида иттрия значения ζ -потенциала зольей увеличиваются с $(-0,14 \pm 1,76) \cdot 10^{-3}$ мВ для золя с концентрацией оксида иттрия 1 % (по массе) до $(-3,21 \pm 3,18) \cdot 10^{-2}$ мВ для золя с концентрацией 10 % (по массе), однако является достаточно небольшим и свидетельствует об их низкой агрегативной устойчивости (68–97 дней).

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ А.В. Истомину, Д.В. Зайцеву, П.Л. Журавлевой, С.В. Житнюку, А.Г. Загоре и Г.Б. Эльдяевой за помощь в проведении исследований и анализа результатов.

Список источников

1. Кузьмина И.Г., Светлов И.Л., Евсеева Н.Л. Получение направленной кристаллизацией крупногабаритных высокоогнеупорных форм и стержней с наноструктурным упрочнением для литья лопаток ГТД из Nb-композитов // Специальные способы литья. 2016. № 10. С. 17–21.
2. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Кочетков А.С. Особенности технологии изготовления высокоогнеупорных керамических форм для получения отливок из γ -TiAl сплавов // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40.
3. Стрельникова С.С. Особенности спекания муллитовой керамики из золь-гель порошков с добавкой оксида иттрия // Перспективные материалы. 2011. № 11. С. 336–341.
4. Kan Y., Zhang G., Wang P. et al. Yb_2O_3 and Y_2O_3 co-doped zirconia ceramics // Journal European Ceramic Society. 2006. Vol. 26. Is. 16. P. 3607–3612.
5. Cosentino I.C., Muccillo R. Powder synthesis and sintering of high density thoria-yttria ceramics // Journal of Nuclear Materials. 2002. Vol. 304. Is. 2–3. P. 129–133.
6. Лемешев Д.О., Лукин Е.С., Макаров Н.А., Попова Н.А. Перспективы создания новых оптически прозрачных материалов на основе оксида иттрия и иттрийалюминиевого граната // Стекло и керамика. 2008. № 4. С. 25–27.
7. Баковец В.В., Трушникова Л.Н., Корольков И.В. и др. Синтез наноструктурированного люминофора Y_2O_3 -Eu-Vi золь-гель методом // Журнал общей химии. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3–11.
8. Пузырев И.С., Иванов М.Г., Крутикова И.В. Физико-химические свойства нанопорошков Al_2O_3 и Y_2O_3 , полученных методом лазерного синтеза, и их водных дисперсий // Известия Академии наук. Серия химическая. 2014. № 7. С. 1504–1510.
9. Lakhdera Y., Tucka C., Binnerc J. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials // Progress in Materials Science. 2021. Vol. 116. Art. 10736.
10. Alhaji A., Shoja Razavi R., Ghasemi A., Loghman-Estarki M.R. Modification of Pechini sol-gel process for the synthesis of MgO- Y_2O_3 composite nanopowder using sucrose-mediated technique // Ceramics International. 2017. Vol. 43. P. 2541–2548.
11. Cheng X., Yuan C., Blackburn S., Withey P.A. The study of the influence of binder systems in an Y_2O_3 - ZrO_2 facecoat material on the investment casting slurries and shells properties // Journal of the European Ceramic Society. 2014. Vol. 34. No. 12. P. 3061–3068.
12. Cui R., Zhang H., Tang X. et al. Gong Interactions between γ -TiAl melt and Y_2O_3 ceramic material during directional solidification process // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. P. 2415–2420.

13. Neto R., Duarte T., Alves J.L., Torres F. Experimental characterization of ceramic shells for investment casting of reactive alloys // *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. 2017. Vol. 29. P. 34–39.
14. Белова И.А. Синтез и коллоидно-химические свойства гидрозолей оксигидроксида иттрия: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2010. 17 с.
15. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
16. Wang L., Fan S., Sun H. et al. Pressure-less joining of SiC/SiC composites by $Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ glass: Microstructure and properties // *Ceramic International*. 2020. Vol. 46. No. 17. P. 27046–27056.
17. Zhou L., Huang J., Cao L. et al. A novel design of oxidation protective $\beta-Y_2Si_2O_7$ nanowire toughened $Y_2SiO_5/Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ glass ceramic coating for SiC coated carbon/carbon composites // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 135. P. 233–242.
18. Courcot E., Rebillat F., Teyssandier F., Louchet-Pouillier C. Thermochemical stability of the $Y_2O_3-SiO_2$ system // *Journal of the European Ceramic Society*. 2010. Vol. 30. P. 905–910.
19. Соколов А.В., Дейнега Г.И., Кузьмина Н.А. Влияние добавки Sc_2O_3 на температуру спекания и свойства оксидной керамики системы $ZrO_2-Y_2O_3$ // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1. С. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
20. Каблов Е.Н., Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Мараховский П.С., Столярова В.Л. Исследование физико-химических свойств керамики на основе системы $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ для разработки теплозащитных покрытий // *Журнал неорганической химии*. 2020. Т. 65. № 6. С. 846–855.
21. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. Kuzmina I.G., Svetlov I.L., Evseeva N.L. Obtaining a directed crystallization of large-sized high-rise forms and rods with nanostructural hardening for casting GTD blades from NB-composites. *Spetsialnye sposoby litya*, 2016, no. 10, pp. 17–21.
2. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Kochetkov A.S. Features of the manufacturing technology of highly refractory ceramic molds for castings from $\gamma-TiAl$ alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 8, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40.
3. Strelnikova S.S. Features of sintering of mullite ceramics from ash-gel powders with the addition of its oxide. *Perspektivnye materialy*, 2011. no. 11, pp. 336–341.
4. Kan Y., Zhang G., Wang P. et al. Yb_2O_3 and Y_2O_3 co-doped zirconia ceramics. *Journal European Ceramic Society*, 2006, vol. 26, is. 16, pp. 3607–3612.
5. Cosentino I.C., Muccillo R. Powder synthesis and sintering of high density thoria-yttria ceramics. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 304, is. 2–3, pp. 129–133.
6. Lemyshev D.O., Lukin E.S., Makarov N.A., Popova N.A. The prospects for creating new optically transparent materials based on its oxide and Italiaalumine grenade. *Steklo i keramika*, 2008, no. 4, pp. 25–27.
7. Bakovets V.V., Trushnikova L.N., Korolkov I.V. and other synthesis of nanostructured phosphor $Y_2O_3-Eu-Bi$ gel method. *Zhurnal obshchey khimii*, 2013, vol. 83, is. 1, pp. 3–11.
8. Puzyrev I.S., Ivanov M.G., Krutikova I.V. The physico-chemical properties of Nanoporos Al_2O_3 and Y_2O_3 , obtained by laser synthesis, and their water dispersions. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*, 2014, no. 7, pp. 1504–1510.
9. Lakhdera Y., Tucka C., Binnerc J. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 116, art. 10736.
10. Alhaji A., Shoja Razavi R., Ghasemi A., Loghman-Estarki M.R. Modification of Pechini sol-gel process for the synthesis of $MgO-Y_2O_3$ composite nanopowder using sucrose-mediated technique. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, pp. 2541–2548.

11. Cheng X., Yuan C., Blackburn S., Withey P.A. The study of the influence of binder systems in an Y_2O_3 - ZrO_2 facecoat material on the investment casting slurries and shells properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, no. 12, pp. 3061–3068.
12. Cui R., Zhang H., Tang X. et al. Gong Interactions between γ -TiAl melt and Y_2O_3 ceramic material during directional solidification process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, vol. 21, pp. 2415–2420.
13. Neto R., Duarte T., Alves J.L., Torres F. Experimental characterization of ceramic shells for investment casting of reactive alloys. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2017, vol. 29, pp. 34–39.
14. Belova I.A. *Synthesis and colloid-chemical properties of hydroxoids of its oxoxide*: thesis abstract Cand. Sc (Chem.). Moscow, 2010, 17 p.
15. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Sorokin O.Yu. Ceramic materials aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 21, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
16. Wang L., Fan S., Sun H. et al. Pressure-less joining of SiC/SiC composites by Y_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 glass: Microstructure and properties. *Ceramic International*, 2020, vol. 46, no. 17, pp. 27046–27056.
17. Zhou L., Huang J., Cao L. et al. A novel design of oxidation protective β - $Y_2Si_2O_7$ nanowire toughened Y_2SiO_5/Y_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 glass ceramic coating for SiC coated carbon/carbon composites. *Corrosion Science*, 2018, vol. 135, pp. 233–242.
18. Courcot E., Rebillat F., Teyssandier F., Louchet-Pouillier C. Thermochemical stability of the Y_2O_3 - SiO_2 system. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, vol. 30, pp. 905–910.
19. Sokolov A.V., Deynega G.I., Kuzmina N.A. Influence of Sc_2O_3 additive on sintering temperature and properties of ZrO_2 - Y_2O_3 system oxide ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
20. Kablov E.N., Doronin O.N., Artemenko N.I., Stukhov P.A., Marakhovsky P.S., Stolyarova V.L. The study of the physicochemical properties of ceramics based on the SM_2O_3 - Y_2O_3 - HFO_2 system for the development of heat-protective coatings. *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 846–855.
21. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Лебедева Юлия Евгеньевна, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чайникова Анна Сергеевна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щеголева Наталья Евгеньевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Беляченков Иван Олегович, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Турченко Максим Витальевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yulia E. Lebedeva, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna S. Chainikova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya E. Shchegoleva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan O. Belyachenkov, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim V. Turchenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.09.2022.

The article was submitted 26.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 02.09.2022.