

УДК 621.763 + 621.762.24

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-44-54>

Научная статья

Research article



Синтез и исследование свойств порошков диоксида циркония с различным содержанием иттрия

С.В. Буйначев^{1,2}, М.А. Домашенков^{1,2}, М.А. Машковцев², Д.О. Поливода², Н.В. Жиренкина¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

² Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН
Россия, 620066, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20

✉ Максим Александрович Домашенков (maks84155@gmail.com)

Аннотация: В рамках работы проведено изучение влияния содержания иттрия на изменение свойств частиц как в ходе контролируемого осаждения, так и после термообработки. Осаждение проводили при постоянном значении pH = 5 из азотно-кислых растворов, где концентрация циркония составляла 1 моль/дм³, а содержание иттрия – от 0 до 30 % в пересчете на их оксиды. Температуры сушки и обжига осадков составляли 40 и 1000 °С соответственно. Показано, что при содержании Y вплоть до 15 % происходит постоянное увеличение среднего диаметра частиц гидроксида циркония в процессе осаждения, при повышении концентрации Y до 30 % средний размер частиц возрастает в течение первых 10 мин осаждения, после чего происходит его плавное снижение. Наибольший диаметр частиц наблюдался у образца с 7 % Y. Во всех случаях отмечено формирование сферидальных агрегатов. При этом с повышением содержания Y происходят сглаживание границ между частицами и снижение степени соосаждения Y в процессе синтеза с 80 до 60 %. В зависимости от концентрации иттрия получены различные модификации порошков стабилизированного диоксида циркония: при 2–7 % Y – тетрагональный ZrO₂, а при 15–30 % Y – кубический ZrO₂. Таким образом, полученные в ходе исследований результаты могут быть полезны для разработки технологии производства порошковых материалов для различного применения.

Ключевые слова: стабилизированный диоксид циркония, осаждение, агрегация, термобарьерные покрытия.

Для цитирования: Буйначев С.В., Домашенков М.А., Машковцев М.А., Поливода Д.О., Жиренкина Н.В. Синтез и исследование свойств порошков диоксида циркония с различным содержанием иттрия. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):44–54. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-44-54>

Synthesis and study of the properties of zirconium dioxide powders with different yttrium content

S.V. Buinachev^{1,2}, M.A. Domashenkov^{1,2}, M.A. Mashkovtsev², D.O. Polivoda², N.V. Zhirenkina¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Yekaterinburg, Sverdlovsk region 620002, Russia

² Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
20 Akademicheskaya Str., Yekaterinburg 620066, Russia

✉ Maksim A. Domashenkov (maks84155@gmail.com)

Abstract: As part of the study, the influence of yttrium content on the properties of particles during controlled precipitation and after thermal treatment was investigated. Precipitation was carried out at a constant pH of 5 from nitric acid solutions, where the concentration of zirconium was 1 mole/dm³ and the yttrium content ranged from 0 to 30 % based on their oxides. The drying and calcination temperatures of the precipitates were 40 °C and 1000 °C, respectively. It was shown that with a yttrium content of up to 15 %, there was a consistent increase in the average diameter of

zirconium hydroxide particles during deposition. When the yttrium concentration was increased to 30 %, the average particle size increased during the first 10 minutes of deposition, followed by a gradual decrease. The largest particle diameter was observed in the specimen with 7 % yttrium. In all cases, the formation of spherical aggregates was observed. With an increasing yttrium content, the boundaries between particles became smoother, and the degree of co-deposition of yttrium during synthesis decreased from 80 % to 60 %. Depending on the yttrium concentration, different modifications of stabilized zirconium dioxide powders were obtained: tetragonal ZrO_2 for 2–7 % yttrium, and cubic ZrO_2 for 15–30 % yttrium. Therefore, the results obtained during the study can be useful for the development of technology for the production of powdered materials for various applications.

Key words: stabilized zirconium dioxide, deposition, aggregation, thermal barrier coatings.

For citation: Buinachev S.V., Domashenkov M.A., Mashkovtsev M.A., Polivoda D.O., Zhirenkina N.V. Synthesis and study of the properties of zirconium dioxide powders with different yttrium content. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(2):44–54.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-44-54>

Введение

Стабилизированный диоксид циркония применяется во многих областях промышленности: для создания термобарьерных покрытий [1–3], производства керамических изделий в медицине [4–6], получения электролитов твердооксидных электрохимических устройств [7–9]. Он обладает низким показателем теплопроводности [10], высокой химической и коррозионной стойкостью [11], хорошей кислородной проводимостью, а также биологической совместимостью с тканями человеческого организма [12].

Для формирования термобарьерных покрытий на детали газотурбинных двигателей зачастую используют метод атмосферно-плазменного напыления (АПН) и применяют порошки диоксида циркония, стабилизированного иттрием (7 %) (YSZ) [13–15]. При этом порошок YSZ должен обладать высокой насыпной плотностью, низкой удельной поверхностью, сфероидальной формой частиц размером в диапазоне от 20 до 100 мкм, а также высокой текучестью [16]. Покрытие, полученное с помощью технологии АПН, позволяет снизить скорость эрозии детали, увеличить адгезионную и коррозионную прочность при термоциклировании на больших температурах [17].

Также порошки YSZ применяются в производстве слитков для вакуумно-лучевого испарения [18]. С их помощью формируют термобарьерные покрытия столбчатой структуры на лопатки газотурбинных двигателей [19–21]. Столбчатое покрытие по сравнению с покрытием, нанесенным с помощью АПН, обладает большей адгезионной стойкостью, меньшими модулем упругости и шероховатостью поверхности [22].

Распространенными способами получения стабилизированного диоксида циркония в промышленности являются технологии прямого и обратного осаждения гидроксидов циркония [23]

и стабилизирующего компонента, золь-гель процесс [24] и распылительный пиролиз [25]. Однако все они не позволяют контролировать свойства осадков, а следовательно, и конечных порошковых материалов. При этом известно, что при использовании методов осаждения свойства осадков гидроксидных материалов сильно зависят от значения pH [26].

Прямым и обратным осаждением, как правило, получают порошки с осколочной формой частиц и широким распределением по размерам. С помощью золь-гель метода зачастую синтезируют мелкодисперсные порошки, при этом используют органические связующие и растворители, что усложняет технологию и процесс масштабирования. Путем распылительного пиролиза можно получать частицы сфероидальной формы размером от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Однако получение крупных частиц диаметром от 20 до 100 мкм является практически невозможным. Метод достаточно сложен как в технической реализации, так как требует высоких температур, так и в масштабировании.

Авторами [27] показано, что путем варьирования значения pH в условиях контролируемого осаждения возможно получение гидроксида циркония с различными свойствами, такими как средний диаметр и форма частиц, удельная поверхность и пористость, а также выявлено, что добавка иттрия в ходе этого процесса приводит к их изменению.

Таким образом, метод осаждения в контролируемых условиях может быть перспективным способом для синтеза гидроксидных материалов с требуемыми свойствами, которые могут быть использованы в различных сферах промышленности.

В настоящей работе рассмотрено влияние содержания иттрия в ходе контролируемого осажде-

ния при постоянном значении $pH = 5$ на свойства осадков гидроксида циркония и иттрия, а также порошков после термообработки; получены образцы оксида циркония с содержанием до 30 % Y; выполнен анализ гранулометрического состава и формы частиц как в ходе осаждения, так и после обжига; проведено исследование степени соосаждения иттрия при осаждении и фазового состава порошков после обжига.

Методы исследования

Синтез гидроксида циркония с различным содержанием иттрия проводили методом контролируемого осаждения при постоянном значении $pH = 5$. Исходные растворы нитратов циркония и иттрия готовили путем растворения карбоната циркония и оксида иттрия в азотной кислоте. В качестве осадителя использовали 10 %-ный раствор аммиака. Перед каждым осаждением готовили по 1 дм³ раствора, содержащего 123 г циркония в пересчете на оксид, и рассчитанное количество иттрия для достижения его концентрации 0, 2, 4, 7, 15 и 30 % в пересчете на оксид в конечном порошке (далее по тексту — образцы 0%Y, 2%Y, 4%Y, 7%Y, 15%Y и 30%Y соответственно).

Осаждение проводили в 3-литровом стеклянном стакане при постоянном перемешивании с помощью верхнеприводной мешалки. Совместный раствор нитратов циркония и иттрия дозировали в реактор с использованием перистальтического насоса со скоростью 5 мл/мин. Раствор осадителя вводили перистальтическим насосом, который был соединен при помощи релейной системы управления с pH-метром, благодаря чему контролировались дозирование аммиака и поддержка постоянного значения pH. Процесс осаждения проводили в течение 200 мин, после чего для образцов с добавкой иттрия проводили его доосаждение путем повышения pH до 8. Далее суспензию фильтровали на вакуумном нутч-филт্রে, сушили при температуре 40 °С в течение 24 ч и обжигали при 1000 °С.

Средний диаметр частиц и их распределение по размерам определяли методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22 («Fritsch», Германия) в диапазоне измерений от 0,08 до 2000 мкм с помощью зеленого и инфракрасного лазеров. Для этого в ходе осаждения проводили отбор суспензии из реактора на различных этапах. Форму частиц оценивали при помощи оптического микроскопа GX71 («OLYMPUS», Япония). Концен-

трацию иттрия в маточном растворе определяли методом комплексометрического титрования при помощи трилона Б. Рентгенограммы образцов получали при помощи дифрактометра X'Pert Pro MPD («PANalytical B.V.», Нидерланды) с твердотельным пиксельным детектором в CuK_{α} -излучении с β -фильтром. Фазовый состав и параметры решетки определяли полнопрофильным анализом Ритвельда, а области когерентного рассеяния (ОКР) — методом Шеррера по наиболее интенсивным отражениям при малых углах рассеяния (фактор формы $K = 0,9$) с использованием программного обеспечения X'Pert High Score Plus (Нидерланды),

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлено изменение среднего диаметра частиц (d) и дисперсии размеров в зависимости от длительности осаждения (τ). Показано, что в образце 0%Y происходит увеличение значения d начиная с 5-й минуты процесса осаждения, и к 200-й минуте оно составило 33 мкм. Добавление иттрия в количестве 2 и 4 % привело к значимому росту этого показателя на протяжении всего процесса осаждения, и к 200-й минуте он достиг 38 мкм. В образце 7%Y наблюдалось еще большее увеличение размера частиц, который к концу осаждения составил 40 мкм. При добавлении 15 % Y происходило существенное увеличение среднего диаметра частиц до 39 мкм в течение первых 100 мин осаждения, после чего он практически не изменялся. В то же время для образца 30%Y зафиксировано резкое увеличение значения d к 20-й минуте осаждения — до 28 мкм, после чего оно плавно снижалось до 23 мкм вплоть до завершения процесса.

Показатель дисперсии размеров для образца 0%Y падал на всем протяжении осаждения и к 200-й минуте достиг 1,08. Для образцов с содержанием иттрия от 2—15 % значения этого параметра снизились к 70-й минуте осаждения, после чего стали расти и в конце процесса были в диапазоне 1,2—1,28. Для образца 30%Y значение дисперсии размеров на всем протяжении осаждения выше, чем для остальных образцов, и к 200-й минуте достигло 1,3.

На рис. 2 представлено массовое распределение размеров частиц в зависимости от длительности процесса осаждения и добавки иттрия. Показано, что для образцов с содержанием от 0 до 15 % Y в первые 10 мин осаждения происходит форми-

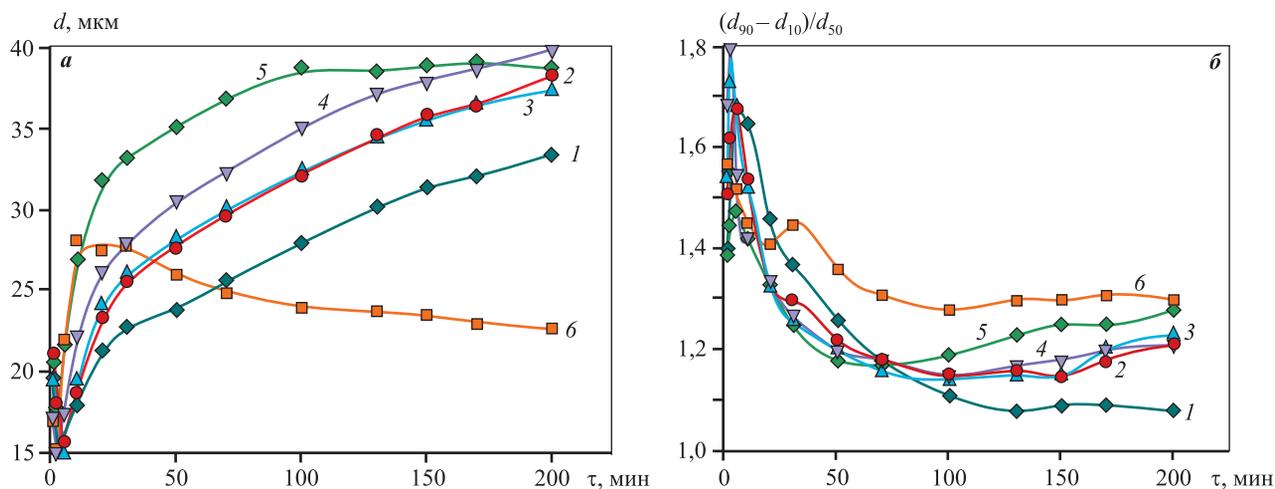


Рис. 1. Изменение среднего диаметра частиц (а) и дисперсии размеров (б) в зависимости от длительности осаждения
 1 – образец 0%Y; 2 – 2%Y; 3 – 4%Y; 4 – 7%Y; 5 – 15%Y; 6 – 30%Y

Fig. 1. Average particle size (a) and dispersion of sizes (b) as a function of precipitation duration

1 – sample 0%Y; 2 – 2%Y; 3 – 4%Y; 4 – 7%Y; 5 – 15%Y; 6 – 30%Y

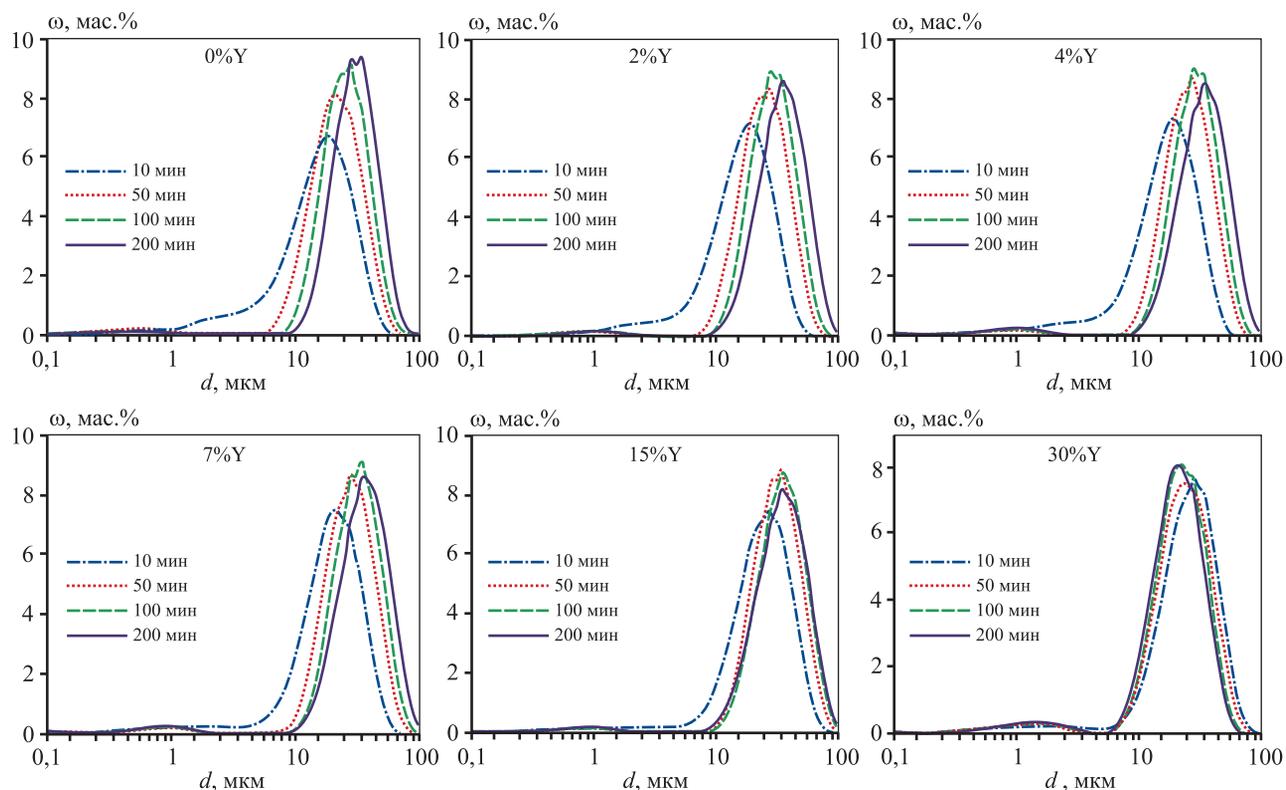


Рис. 2. Массовое распределение частиц по размерам в зависимости от длительности осаждения исследуемых образцов

Fig. 2. Mass distribution of particle sizes as a function of precipitation duration

рование пика в области $\tau = 15 \div 20$ мкм с плечом в диапазоне $d = 1 \div 5$ мкм. С увеличением длительности осаждения оно исчезает и возникает пик при $d \sim 1$ мкм с массовой долей меньше 1%. В то же вре-

мя основной пик равномерно смещается в область больших размеров, что соответствует увеличению среднего диаметра частиц. При этом пик при $d \sim 1$ мкм практически не изменяет своего положе-

ния. Для образца 30%Y к 10-й минуте осаждения формируются пик в области $d \sim 30$ мкм и плечо в диапазоне $d = 1\div 5$ мкм. С увеличением длительности осаждения основной пик смещается в область меньших размеров, а плечо трансформируется в отдельный пик с максимумом в диапазоне $d = 1\div 2$ мкм.

Вероятно, образование в ходе осаждения двух популяций частиц приводит к увеличению их среднего диаметра за счет послойной взаимной агрегации. По всей видимости, проведение гидролиза при постоянном значении pH приводит к появлению одинаково заряженных первичных зародышей, которые при соударениях агрегируют с формированием более крупных частиц с последующей сменой заряда на поверхности за счет процессов оляции.

Таким образом, одновременно проходящие процессы образования зародышей с одним зарядом и появления более крупных частиц с противоположным зарядом служат основой механизма происходящих процессов агрегации. При этом добавка иттрия в ходе осаждения, по всей видимости, существенно влияет на протекание процессов оляции и оксоляции. Можно предположить, что ее наличие приводит к увеличению заряда поверхности первичных частиц, что затрудняет их агрегацию между собой. Такие зародыши преимущественно начинают наслаиваться на сформиро-

ванные крупные агрегаты с противоположным знаком, что и приводит к значимому увеличению среднего диаметра частиц при добавлении иттрия. При этом при содержании 30 % Y процесс послойной агрегации затруднен, крупные агрегаты перестают увеличиваться в размерах, происходит рост доли мелких частиц. По-видимому, слишком высокое содержание иттрия практически полностью подавляет процессы оляции и приводит к нейтрализации заряда на поверхности крупных агрегатов, что влечет за собой увеличение размера частиц тех агрегатов, где заряд еще не нейтрализован.

На рис. 3 представлены оптические изображения частиц к 200-й минуте осаждения для образцов с различным содержанием иттрия. Показано, что в образце без добавления Y происходит формирование сфероидальных агрегатов с хорошо различимыми, но неровными границами. Постепенное повышение содержания Y приводит к формированию сфероидальных агрегатов с более гладкими границами. При этом установлено, что введение иттрия вплоть до 15 % приводит к увеличению размеров частиц и агрегатов, а повышение его содержания до 30 % — к их снижению, что согласуется с результатами лазерной дифракции.

Влияние добавки иттрия на форму частиц может быть объяснено тем же подходом, примененным при анализе изменения размера частиц, осно-

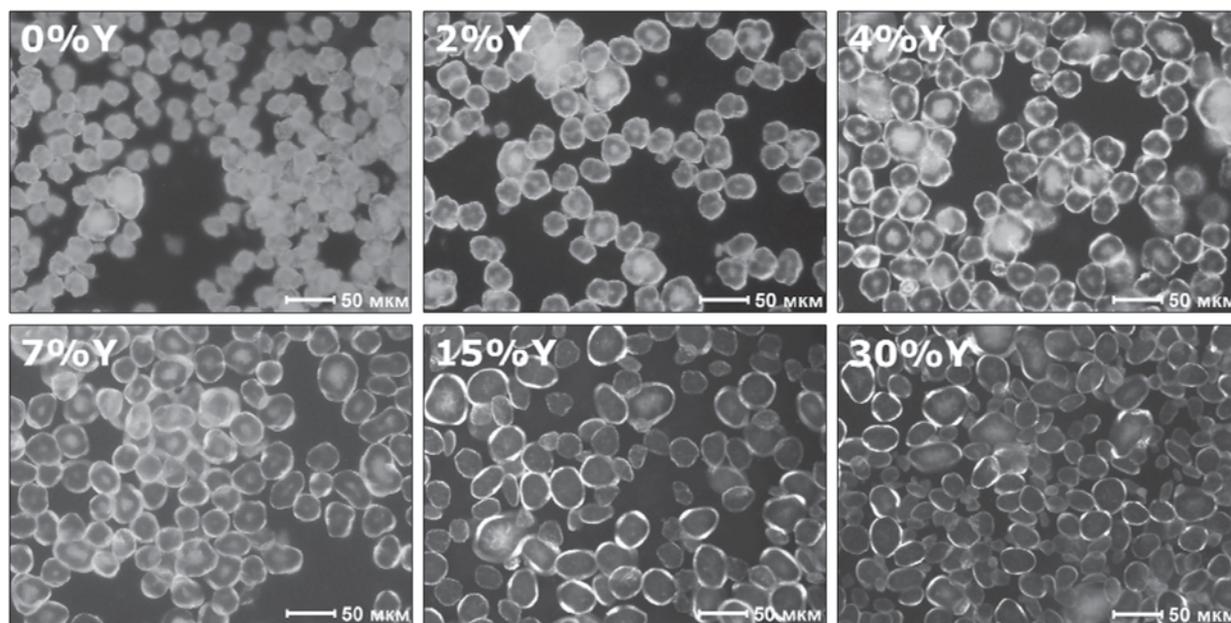


Рис. 3. Оптические изображения частиц исследуемых образцов к 200-й минуте осаждения

Fig. 3. Optical images of particles of the investigated specimens by the 200th minute of deposition

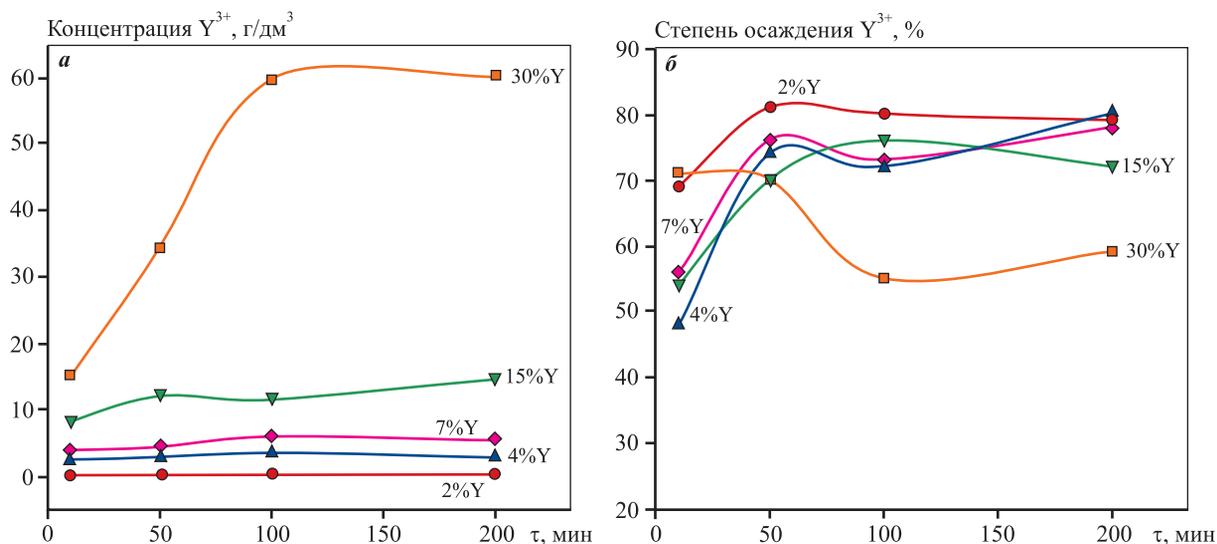


Рис. 4. Изменение концентрации (а) и степени соосаждения (б) катионов иттрия в суспензии в зависимости от длительности осаждения

Fig. 4. Concentration (а) and co-deposition rate (б) of yttrium cations in slurry as a function of precipitation duration

ванным на разнице в их заряде. Как было сказано ранее, при добавлении иттрия агрегация первичных частиц между собой затруднена, что в первую очередь приводит к увеличению столкновений очень мелких первичных частиц с более крупными, тем самым способствуя формированию ровных гладких границ на поверхности.

На рис. 4 представлено изменение концентрации катионов иттрия Y^{3+} в суспензии в ходе осаждения и степени соосаждения иттрия совместно с гидроксидом циркония в зависимости от времени процесса. Показано, что для образцов 2%Y, 4%Y, 7%Y и 15%Y происходит постепенное увеличение концентрации Y^{3+} с увеличением длительности осаждения, и к его концу она составляет 0,3, 3,0, 5,5 и 15 г/дм³ соответственно. Для образца 30%Y к 100-й минуте процесса происходит резкий рост содержания Y^{3+} до 60 г/дм³, после чего оно практически не меняется. В то же время степень соосаждения иттрия с гидроксидом циркония к 200-й минуте процесса для образцов 2%Y, 4%Y и 7%Y находится на уровне 80 %, а для 15%Y и 30%Y — 72 % и 60 % соответственно.

Таким образом, несмотря на низкое значение pH процесса осаждения, значительная часть иттрия так или иначе захватывается осадком гидроксида циркония. Вероятно, это происходит за счет высокой (избыточной) концентрации OH^- -групп на поверхности гидроксида, которые присоединяет катион Zr^{4+} при формировании гидроксида циркония.

На рис. 5 представлено изменение среднего диаметра частиц и дисперсии размеров в зависимости от стадии синтеза образцов. Показано, что значения d ступенчато снижаются после сушки при $t = 40$ °C и обжига при 1000 °C. После обжига средний размер частиц для образца 0%Y составил 22 мкм, для 2%Y–15%Y — на уровне 25 мкм, а для 30%Y — 17 мкм. Значения дисперсии размеров после обжига образцов с содержанием иттрия вплоть до 15 % находятся практически на одном уровне — около 1,1, а для образца 30%Y — в области 1,4.

На рис. 6 представлено распределение частиц по размерам в зависимости от стадии синтеза образцов. Для образцов с содержанием иттрия вплоть до 15 % после обжига при 1000 °C наблюдается узкий высокий пик, который по сравнению с суспензией и сушкой значительно сместился влево — в область меньших размеров частиц. При этом форма пика существенно не изменилась, что говорит о том, что ни разрушения, ни дополнительной агрегации в ходе термообработки не происходит. Для образца 30%Y распределение частиц по размерам после обжига выглядит подобным образом, однако пик распределения шире и ниже в сравнении с остальными образцами. Это может быть связано с тем, что еще на стадии осаждения крупные агрегаты практически не изменялись в размерах, но при этом происходило формирование большого количества новых агрегатов.

На рис. 7 представлены оптические изображения частиц после обжига при 1000 °C образцов с различ-

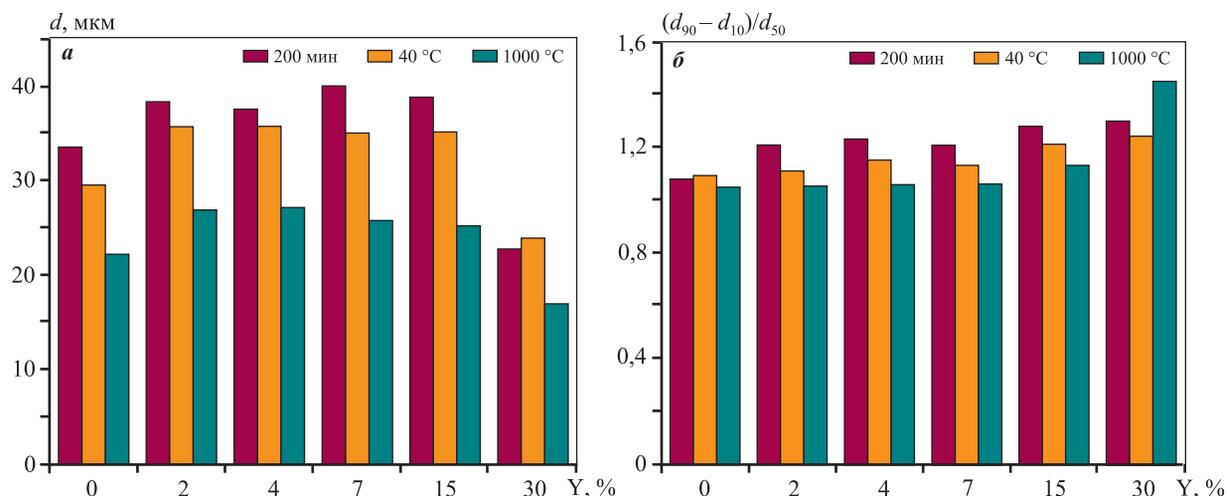


Рис. 5. Значения среднего диаметра частиц (а) и дисперсии размеров (б) на разных этапах синтеза исследуемых образцов

Fig. 5. Average particle size (a) and dispersion of sizes (b) at various stages of synthesis of the considered specimens

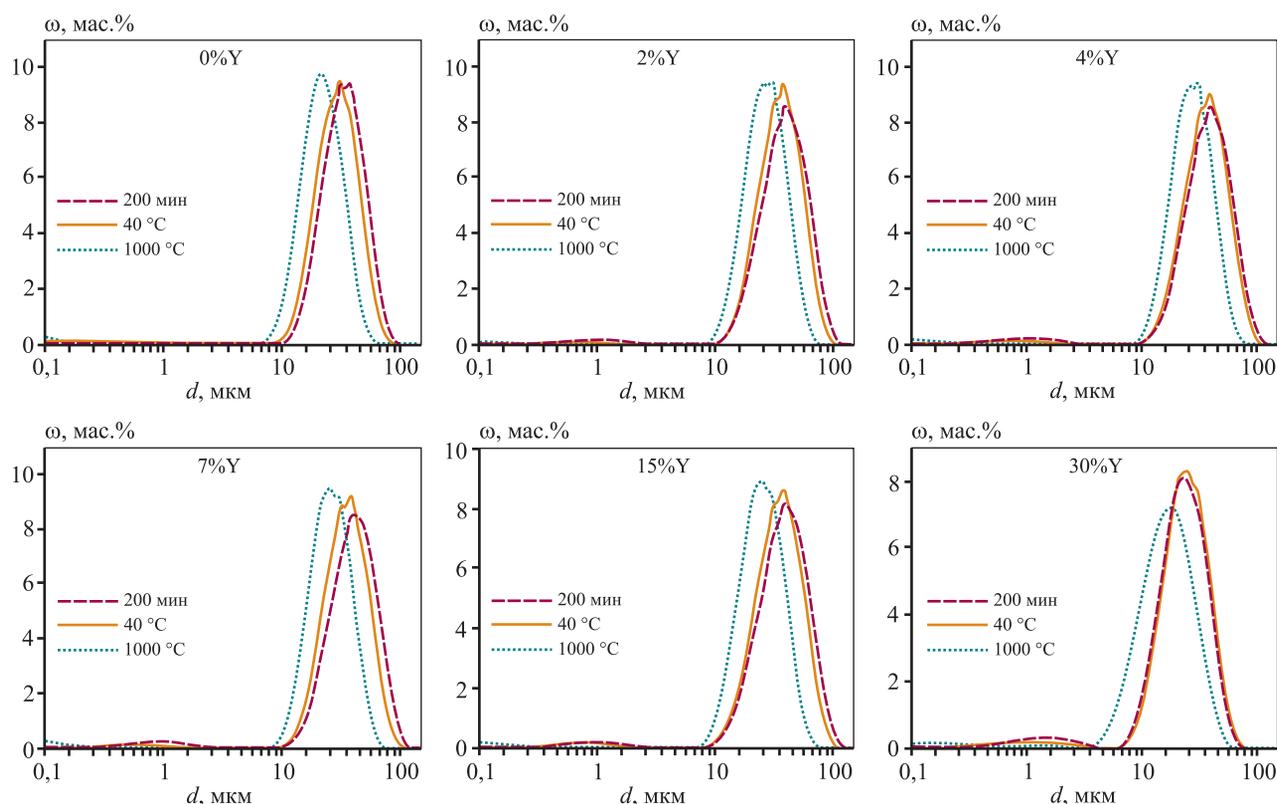


Рис. 6. Распределение частиц по размерам на разных этапах синтеза исследуемых образцов

Fig. 6. Particle size distribution at various stages of synthesis of the considered specimens

ным содержанием иттрия. Показано, что у всех них после обжига сохраняется сфероидальная форма частиц с неровными границами у образцов 0%Y, 2%Y и 4%Y и сглаженными — у 7%Y, 15%Y и 30%Y.

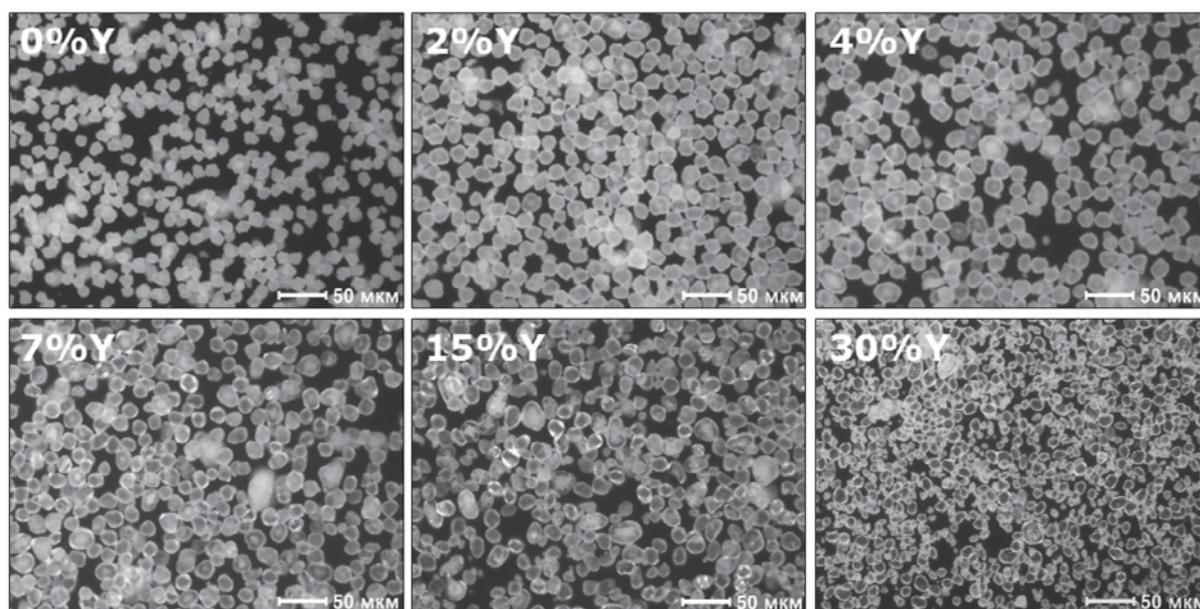
Известно, что диоксид циркония может находиться в трех различных кристаллических мо-

дификациях в зависимости от температуры: моноклинной при комнатной температуре, тетрагональной при $t > 1170$ °C и кубической при $t > 2370$ °C. Для увеличения его термостабильности вводят стабилизирующие компоненты, самым распространенным из которых является оксид

Результаты рентгенофазового анализа образцов диоксида циркония с различным содержанием иттрия

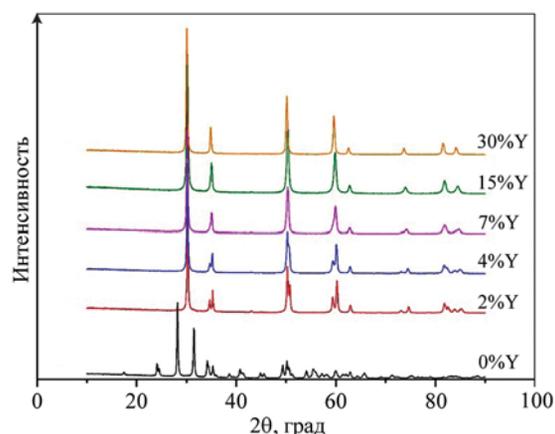
X-ray phase analysis of zirconium dioxide with various content of yttrium

Образец	Размер кристаллитов, нм	Тип модификации	Параметры решетки, Å		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0%Y	48	Моноклинная	5,147	5,202	5,312
2%Y	60	Тетрагональная	3,595	3,595	5,175
4%Y	51	Тетрагональная	3,603	3,603	5,170
7%Y	42	Тетрагональная	3,614	3,614	5,153
15%Y	28	Кубическая	5,127	5,127	5,127
30%Y	42	Кубическая	5,142	5,142	5,142

**Рис. 7.** Оптические изображения частиц после обжига при 1000 °С исследуемых образцов**Fig. 7.** Optical images of particles after annealing at 1000 °C

иттрия. Близость ионных радиусов Zr и Y, а также изоморфность структуры делают возможным формирование твердого раствора при введении Y в кристаллическую решетку ZrO_2 . Стабилизация диоксида циркония низковалентными катионами может приводить к стабилизации тетрагональной или кубической фазы при более низких температурах — вплоть до комнатной. Это связано с генерацией вакансий кислорода в решетке, что, в свою очередь, приводит к уменьшению напряжения, вызванного энергетически неблагоприятной 8-узловой координацией [28].

В зависимости от содержания иттрия были получены 3 структурные модификации оксида циркония после обжига при 1000 °С. Данные рентгенофазового анализа представлены в таблице. Так, оксид циркония без добавки иттрия обла-

**Рис. 8.** Рентгенограммы исследуемых образцов после обжига при $t = 1000$ °С**Fig. 8.** X-ray patterns of the considered specimens after annealing at $t = 1000$ °C

дает моноклинной структурной модификацией, размер кристаллитов составляет 48 нм. Образцы с содержанием 2, 4 и 7 % Y характеризуются тетрагональной модификацией. Это подтверждается меньшими значениями длин ребер относительно моноклинной модификации. Размер кристаллитов уменьшается с увеличением содержания иттрия, что согласуется с литературными данными [29], и лежит в интервале от 40 до 60 нм. В то же время для диоксида циркония с добавкой 15 и 30 % Y происходит формирование кубической модификации, о чем свидетельствуют близкие параметры длины ребер. При этом размеры кристаллитов составляют 28 и 42 нм соответственно. На рентгенограммах всех образцов, модифицированных иттрием, отсутствуют пики, соответствующие чистому оксиду иттрия, что говорит о том, что он равномерно распределен в диоксиде циркония с образованием твердого раствора замещения.

Заключение

В работе получены образцы диоксида циркония с различным содержанием иттрия методом контролируемого осаждения при постоянном значении pH. Проведено исследование влияния количества добавки Y в ходе осаждения на изменение среднего диаметра частиц, дисперсии их размеров, распределение частиц по размерам и их форму, а также степень осаждения иттрия и фазовый состав конечных порошков. Предложен механизм процесса агрегации гидроксида циркония в условиях осаждения при постоянном значении pH и рассмотрено влияние добавки иттрия на его протекание.

Установлено, что содержание иттрия значительно влияет на размер получаемых частиц в ходе осаждения: в образцах без добавки средний диаметр частиц составил 33 мкм, а при введении 7 % Y — 40 мкм. Выявлено, что при значении pH процесса осаждения, равном 5, происходит соосаждение иттрия совместно с гидроксидом циркония. При этом в зависимости от содержания иттрия степень его осаждения находится в диапазоне от 60 до 80 %.

После термообработки разрушения или дополнительной агрегации частиц не происходит, сфероидальная форма частиц сохраняется, дисперсия размеров находится на низком уровне, что характерно для всех образцов. Были получены различные модификации диоксида циркония в зависимости от содержания иттрия: моноклинная у образца без добавки, тетрагональная при добавлении от 2 до 7 % Y и кубическая при введении более 15 % Y.

Таким образом, полученные результаты могут быть полезны при разработке технологии получения порошков, которые могут быть использованы в различных областях промышленности, в первую очередь для формирования термобарьерных покрытий методом атмосферного плазменного напыления.

Список литературы/References

1. Qiaomu L., Shunzhou H., Aijie H. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(12):2814–2823. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.08.003>
2. Liu G., Shen Z., He L., Mu R., Huang G. LaY₂ZrO₇/YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings by EB-PVD: Thermal performance, morphology and failure behavior. *Materialia*. 2023;27:101661. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101661>
3. Erdoğan N.N., Başığit A.B. Investigating thermal shock and corrosion resistance of Inconel 601 super alloy after thermal barrier coating with 8 % YSZ powder. *Materials Today Communications*. 2023;36:106516. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106516>
4. Moayedee Y., Nikzad L., Habibzadeh S. Mechanical, electrochemical, and biological properties of YSZ-Mo: A new class of bio-composites. *Materialia*. 2022;24:101515. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101515>
5. Piconi C., Maccauro G. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. 1999;20(1):1–25. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00010-6)
6. Xiuping Z., Xin W., Jing S. Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(4):9029–9048. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131>
7. Xiuan X., Hiroya A., Kazuo K., Ryo H., Anze S., Makio N. Novel Co-precipitation method to synthesize NiO–YSZ nanocomposite powder for solid oxide fuel cell. *Advanced Powder Technology*. 2014;25(2):490–494. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2013.08.001>
8. Shao Z., Zhou W., Zhu Z. Advanced synthesis of materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Progress in Materials Science*. 2012;57(4):804–874. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.002>
9. Monaco F., Effori E., Hubert M., Siebert E., Geneste G., Morel B., Djurado E., Montinaro D., Laurencin J. Electrode kinetics of porous Ni–3YSZ cermet operated in fuel cell and electrolysis modes for solid oxide cell application. *Electrochimica Acta*. 2021;389(1):138765. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138765>
10. Jungwan C., Joonsuk P., Jihwan A. Low thermal conductivity of atomic layer deposition yttria-stabilized zirco-

- nia (YSZ) thin films for thermal insulation applications. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37(9):3131–3136. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.045>
11. Raheleh A.-P., Reza S.-R., Reza M., Hossein J. Improving the hot corrosion resistance of plasma sprayed ceria–yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings by laser surface treatment. *Materials & Design*. 2014;57:336–341. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.075>
 12. Nikhil A. P., Balasubramanian K. Biological and mechanical enhancement of zirconium dioxide for medical applications. *Ceramics International*. 2020;46(4):4041–4057. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.220>
 13. Chaoxi S., Jinshuang W., Xianjun L., Tingyang C., Mingyi X., Guang D., Yuancheng R., Zhongwei L., Zhixig D., Yifeng X., Guoqiang L., Yixing Z., Fuhe Y., Xueqiang C. Investigation of corrosion resistance of YSZ coating with sacrificial aluminum oxide protective layer against CMAS and composite corrosives. *Journal of the European Ceramic Society*. 2024;44(4):2537–2579. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.030>
 14. Clarke D.R., Phillpot S.R. Thermal barrier coating materials. *Materials Today*. 2005;8(6):22–29. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)70934-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70934-2)
 15. Padture N.P., Gell M., Jordan E.H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*. 2002;296(5566):280–284. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1068609>
 16. Buinachev S., Mashkovtsev M.A., Zhirenkina N., Aleshin D., Dankova A. A new approach for the synthesis of monodisperse zirconia powders with controlled particle size. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(32):16878–16887. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.134>
 17. Yuzhuo L., Zhen Z., Xin W., Rende M., Limin H., Zhenhua X. Thermo-physical properties, morphology and thermal shock behavior of EB-PVD thermal barrier coating with DLC YbGdZrO/YSZ system. *Materials Today Communications*. 2023;35:106265. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106265>
 18. He W., Mauer G., Sohn Y.J., Schwedt A., Guillon O., Vaßen R. Investigation on growth mechanisms of columnar structured YSZ coatings in plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD). *Journal of the European Ceramic Society*. 2019;39(10):3129–3138. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.003>
 19. Gao L., Guo H., Wei L., Li C., Xu H. Microstructure, thermal conductivity and thermal cycling behavior of thermal barrier coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2015;276:424–430. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.033>
 20. Jude S.A.A., Winowlin Jappes J.T., Adamkhan M. Thermal barrier coatings for high-temperature application on superalloy substrates: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;60(3):1670–1675. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.223>
 21. Vaßen R., Jarligo M.O., Steinke T., Mack D. E., Stöver D. Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2010;205(4):938–942. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.151>
 22. Shan Y., Gao L. Synthesis and characterization of phase controllable ZrO₂-carbon nanotube nanocomposites. *Nanotechnology*. 2005;16(6):625–630. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/6/001>
 23. Fenech J., Dalbin M., Barnabe A., Bonino J.P., Ansart F. Sol-gel processing and characterization of (RE-Y)-zirconia powders for thermal barrier coatings. *Powder Technology*. 2011;208(2):480–487. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.08.046>
 24. Chen C.Y., Tseng T.K., Tsai S.C., Lin C.K., Lin H.M. Effect of precursor characteristics on zirconia and ceria particle morphology in spray pyrolysis. *Ceramics International*. 2008;34(2):409–416. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.10.013>
 25. Zhang H., Lu H., Zhu Y., Fan L., Duan R., Zhang M., Wang X. Preparations and characterizations of new mesoporous ZrO₂ and Y₂O₃-stabilized ZrO₂ spherical powders. *Powder Technology*. 2012;227:9–16. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.007>
 26. Buinachev S., Mashkovtsev M., Dankova A., Zhirenkina N., Kharisova K. Synthesis of YSZ powders with controlled properties by the CDJP method. *Powder Technology*. 2022;399:117201. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117201>
 27. Carter G.A., Ogden M.I., Buckley C.E., Maitland C., Paskevicius M. Ammonia-induced precipitation of zirconium chloride and zirconium–yttrium chloride solutions under industrially relevant conditions. *Powder Technology*. 2009;188:222–228. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.087>
 28. Trovarelli A., Leitenburg C., Boaro M., Dolcet G. The utilization of ceria in industrial catalysis. *Catalysis Today*. 1999;50: 353–367. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(98\)00515-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(98)00515-X)
 29. Agarkova E.A., Borik M.A., Bublik V.T., Volkova T.V., Kulebyakin A.V., Kuritsyna I.E., Larina N.A., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu. Effect of the phase composition and local crystal structure on the transport properties of the ZrO₂–Y₂O₃ and ZrO₂–Gd₂O₃ solid solutions. *Russian Microelectronics*. 2019;48:8:523–530. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-3-156-165>

Информация об авторах

Сергей Владимирович Буйначев – лаборант-исследователь кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); мл. науч. сотрудник лаборатории керамики, Институт высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ) УрО РАН.
<https://orcid.org/0000-0001-7722-9055>
E-mail: s.v.buinachev@urfu.ru

Максим Александрович Домашенков – лаборант-исследователь кафедры редких металлов и наноматериалов, УрФУ; мл. науч. сотрудник лаборатории керамики, ИВТЭ УрО РАН.
<https://orcid.org/0009-0003-8882-9373>
E-mail: maks84155@gmail.com

Максим Алексеевич Машковцев – к.х.н., науч. сотрудник лаборатории электрохимических устройств и топливных элементов, ИВТЭ УрО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-4914-262X>
E-mail: maxftf@yandex.ru

Дмитрий Олегович Поливода – мл. науч. сотрудник лаборатории электрохимических устройств и топливных элементов, ИВТЭ УрО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-3514-9919>
E-mail: sbbthblack@gmail.com

Нина Валерьевна Жиренкина – к.т.н., ст. науч. сотрудник лаборатории перспективных функциональных материалов, УрФУ.
<https://orcid.org/0000-0002-5823-9554>
E-mail: nina_zhirenkina@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Buinachev – Laboratory Assistant-researcher of the Department of Rare Metals and Nanomaterials, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); Junior Researcher of the Laboratory of Ceramics, Institute of High Temperature Electrochemistry of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS).
<https://orcid.org/0000-0001-7722-9055>
E-mail: s.v.buinachev@urfu.ru

Maksim A. Domashenkov – Laboratory Assistant-researcher of the Department of Rare Metals and Nanomaterials, UrFU; Junior Researcher of the Laboratory of Ceramics, IHTE UB RAS.
<https://orcid.org/0009-0003-8882-9373>
E-mail: maks84155@gmail.com

Maksim A. Mashkovtsev – Cand. Sci. (Chem.), Researcher of the Laboratory of Electrochemical Devices and Fuel Cells, IHTE UB RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-4914-262X>
E-mail: maxftf@yandex.ru

Dmitry O. Polivoda – Junior Researcher of the Laboratory of Electrochemical Devices and Fuel Cells, IHTE UB RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-3514-9919>
E-mail: sbbthblack@gmail.com

Nina V. Zhirenkina – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Advanced Functional Materials, UrFU.
<https://orcid.org/0000-0002-5823-9554>
E-mail: nina_zhirenkina@mail.ru

Вклад авторов

С.В. Буйначев – обработка экспериментальных данных, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

М.А. Домашенков – проведение экспериментов, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

М.А. Машковцев – составление плана экспериментов, редактирование текста статьи.

Д.О. Поливода – обработка экспериментальных данных, графическая визуализация результатов исследований.

Н.В. Жиренкина – графическая визуализация данных, проведение экспериментов.

Contribution of the authors

S.V. Buinachev – processed experimental data, wrote the manuscript, participated in the discussion of the results.

M.A. Domashenkov – conducted experiments, wrote the manuscript, processed documents for submitting the manuscript, participated in the discussion of the results.

M.A. Mashkovtsev – designed the experiment plan, revised the manuscript.

D.O. Polivoda – processed experimental data, graphical visualization of data.

N.V. Zhirenkina – graphical visualization of data, conducted experiments.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023, доработана 08.02.2024, подписана в печать 15.02.2024

The article was submitted 05.12.2023, revised 08.02.2024, accepted for publication 15.02.2024