

САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ И ХРОМА

© 2024 г. А. П. Чижиков^{1,*}, М. С. Антипов¹, А. С. Константинов¹,
А. О. Жидович¹, П. М. Бажин¹

¹ *Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мерджанова
Российской академии наук (ИСМАН), Черноголовка, 142432 Россия
e-mail: chij@ism.ac.ru

Поступило в редакцию 23 апреля 2024 г.

После доработки 24 мая 2024 г.

Принято к печати 30 мая 2024 г.

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены керамические композиционные материалы на основе стабилизированного оксида циркония. В качестве стабилизирующей добавки использовался оксид иттрия. В работе изучено влияние содержания добавки оксида иттрия на температуру и скорость горения исследованных материалов. На основе результатов рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии изучено влияние оксида иттрия на фазовый состав и микроструктуру синтезированных материалов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, оксид циркония, оксид иттрия, борид хрома, борид титана

DOI: 10.31857/S0044460X24020154, **END:** GUIUVX

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение новых материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами является актуальной задачей современного материаловедения. Современная промышленность испытывает потребность в материалах, способных работать при повышенных температурах и в условиях воздействия агрессивных сред [1–3]. Перспективным классом материалов, способных работать в таких условиях являются керамические композиционные материалы на основе стабилизированного оксида циркония [4, 5]. Циркониевая керамика обладает высокой температурой плавления, твердостью, прочностью и устойчивостью к растрескиванию, а также коррозионной стойкостью [6–8]. Диоксид циркония обладает ярко выраженными свойствами

полиморфизма. Наиболее изученными и распространенными являются моноклинная, тетрагональная и кубическая модификации [9, 10]. При комнатной температуре термодинамически устойчивой является моноклинная модификация ZrO_2 . При повышении температуры до $1170^\circ C$ происходит переход в тетрагональную модификацию, сопровождающийся изменением объема образца (до 6%), дальнейший нагрев приводит к переходу в кубическую модификацию при температуре $2370^\circ C$ [11]. Поскольку при охлаждении диоксид циркония претерпевает последовательный обратный переход сначала в тетрагональную, а затем в моноклинную модификацию, возникающее изменение объема приводит к растрескиванию компактных образцов из ZrO_2 . Во избежание возникновения эффекта растрескивания и достижения постоянства фазового состава

применяют различные стабилизирующие добавки. На сегодняшний день используется большое количество различных соединений для стабилизации диоксида циркония, например, CaO, MgO, CeO₂ и др. [12–14]. Одним из наиболее часто применяемых является Y₂O₃ [15, 16].

Для получения материалов на основе стабилизированного оксида циркония сегодня используют большое количество различных методов синтеза. Например, золь-гель метод [17, 18], гидротермальный синтез [19–21], карботермический [22, 23] и механосинтез [24, 25]. Перспективным методом получения материалов на основе циркониевой керамики является самораспространяющийся высокотемпературный синтез [26–30]. Данный метод основан на перемещении волны экзотермической химической реакции по исходной смеси реагентов за счет послонной передачи выделяющейся тепловой энергии [31, 32]. Преимуществом данного метода является отсутствие необходимости использования внешнего нагрева, простота используемого оборудования, а также возможность получать высокотемпературные соединения и материалы [33, 34]. Настоящая работа посвящена изучению процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композиционных материалов на основе оксида циркония и боридов титана и хрома. В работе проведено изучение влияния стабилизирующей добавки оксида иттрия на характеристики синтеза выбранных объектов исследования, а также на фазовый состав и структуру получаемых материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта исследования в настоящей работе выступала исходная порошковая система V₂O₃–Cr₂O₃–Zr–Ti–Y₂O₃–B. Указанная система выбрана с целью изучения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композиционных керамических материалов на основе стабилизированного оксида циркония, содержащего соединения хрома. Образование оксида циркония в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, протекающего в указанной исходной системе, происходило за счет взаимодействия свободного циркония с оксидами бора и хрома. Данные химические реакции имеют высокий тепловой эффект и обеспечивают основной

температурный вклад в протекающий процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Адиабатическая температура горения, достигаемая в результате взаимодействия оксида бора с цирконием и образования оксида циркония в результате данного взаимодействия составляет 2700 К. При взаимодействии оксида хрома с цирконием с образованием оксида циркония достигается адиабатическая температура 2600 К. В результате взаимодействия свободного циркония с указанными оксидами происходило выделение свободного бора и хрома. Свободный хром и титан взаимодействовали с бором, образуя при этом бориды титана и хрома. Кроме того, что выбранные восстановительные реакции обладают высокой экзотермичностью, порошок V₂O₃ является источником бора для синтеза боридов титана и хрома в настоящей работе. При этом, оксид бора обладает значительно более низкой стоимостью по сравнению с порошком элементарного бора, что существенно повышает экономическую эффективность процесса синтеза выбранных материалов. Кроме того, получение композиционных материалов на основе оксида циркония, содержащего бориды титана и хрома, возможно путем использования готового порошка ZrO₂ в сочетании с прямыми реакциями синтеза Ti+B и Cr+B, которые также обладают высоким тепловым эффектом. Однако в таком случае, во-первых, значительно увеличивается стоимость материалов, во-вторых, ZrO₂ будет являться инертной добавкой. Оксид циркония имеет высокую температуру плавления (2715°C), что существенно скажется на процессе горения такого композиционного материала, а также на процессе стабилизации оксидом иттрия. Стабилизирование тетрагональной модификации оксида циркония в продуктах синтеза осуществлялось путем введения в исходную систему порошка оксида иттрия. Доля оксида иттрия в исходной системе составляла от 0 до 8.6 мас% (табл. 1). Указанное количество стабилизирующей добавки в исходной смеси соответствовало количеству оксида иттрия в соотношении (100–x)ZrO₂/xY₂O₃ в продуктах синтеза, где x ∈ 0, 9 мол%. Такой диапазон концентраций стабилизирующей добавки выбран в соответствии с тем что, согласно диаграмме состояния системы ZrO₂–Y₂O₃ (рис. 1a) [31], при содержании Y₂O₃ более 9 мол% на диаграмме наблюдается однофазная область кубического ZrO₂. Кроме того, варьирование содержания Y₂O₃ в указанном диапазоне дает

Таблица 1. Соотношение исходных компонентов.

№ образца	Содержание исходных компонентов, мас%						Y ₂ O ₃ , мол%
	B ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Zr	Ti	Y ₂ O ₃	B	
0	21.1	23	41.4	14.5	–	–	0
1	20.7	23	40.7	14.5	1	–	1
2	20.3	23	39.9	14.5	2	0.3	2
3	20	23	39.2	14.5	3	0.3	3
4	19.6	23	38.4	14.5	4	0.5	4
5	19.3	23	37.9	14.5	4.8	0.5	5
6	18.9	23	37	14.5	5.9	0.7	6
7	18.5	23	36.4	14.5	6.8	0.8	7
8	18.2	23	35.7	14.5	7.7	0.9	8
9	17.9	23	35	14.5	8.6	1	9

возможность изучить влияние стабилизирующей добавки на процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в указанной системе. Введение в исходную систему оксида иттрия приводило к увеличению содержания кислорода. По этой причине при увеличении количества Y₂O₃ количество исходного оксида бора снижалось. Для компенсации содержания бора в исходной системе в образцы № 2–9 вводился дополнительный свободный бор.

Экспериментальное изучение характеристик горения выбранных объектов исследования по-

казало, что введение стабилизирующей добавки оказывает влияние на их температуру и скорость горения. Схема проведения экспериментов по измерению характеристик горения приведена на рис. 2. Непосредственно оксид иттрия участия в процессе синтеза не принимает и является инертной добавкой, поскольку образование твердого раствора ZrO₂·Y₂O₃, за счет которого происходит стабилизация оксида циркония, происходит при охлаждении продуктов синтеза. Таким образом, введение Y₂O₃ в исходную систему и увеличение

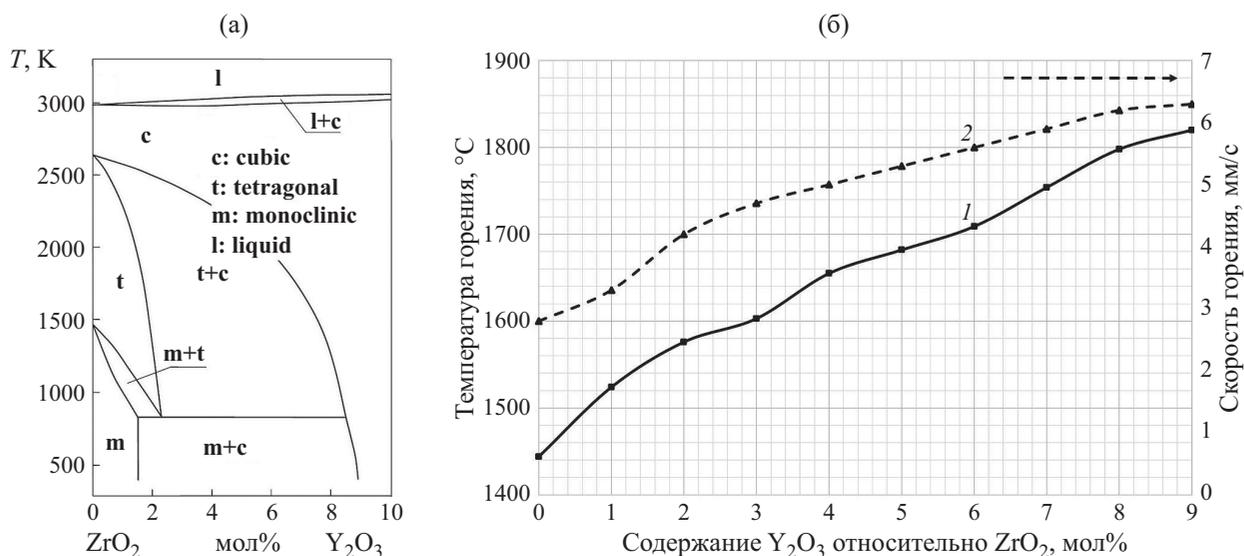


Рис. 1. Диаграмма состояния системы ZrO₂-Y₂O₃ [35] (а) и зависимость температуры (1) и скорости горения исследуемых материалов (2) от содержания Y₂O₃ (б).

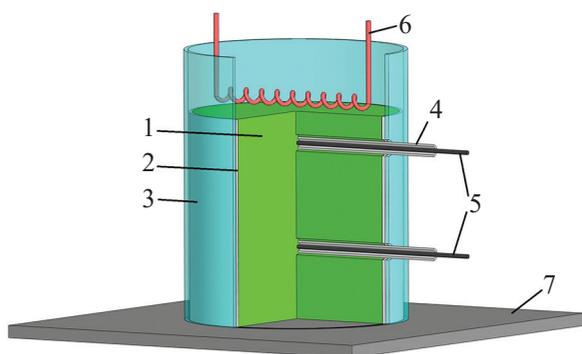


Рис. 2. Схема проведения экспериментов по измерению характеристик горения исследованных материалов: 1 – исходная заготовка, 2 – асбестовая изоляция, 3 – кварцевый стакан, 4 – керамическая трубка, 5 – термопары, 6 – иницирующая спираль, 7 – подложка.

его содержания должно приводить к понижению значений характеристик горения за счет разбавления инертным компонентом. Однако согласно экспериментальным результатам, введение оксида иттрия оказывает обратный эффект. При отсутствии

Y_2O_3 в исходной системе (образец № 0) температура и скорость горения составили $1440^\circ C$ и 2.8 мм/с соответственно. Увеличение содержания оксида иттрия до 1 мас% приводит к повышению температуры и скорости горения до $1520^\circ C$ и 3.3 мм/с соответственно. Дальнейшее увеличение содержания Y_2O_3 в исследованном диапазоне концентраций приводит к монотонному повышению характеристик горения, а именно температуры горения до $1820^\circ C$ и скорости горения до 6.3 мм/с. Таким образом, увеличение содержания стабилизирующей добавки в исследуемых материалах приводит к монотонному повышению температуры горения практически на $400^\circ C$ и температуры горения практически в 2 раза при содержании Y_2O_3 , равном 8.6 мас% (образец № 9). Поскольку переход из тетрагональной модификации в моноклинную, который происходит при охлаждении ZrO_2 при отсутствии стабилизирующей добавки (в образце № 0), сопровождается значительным увеличением объема (до 6%) [36], образцы без Y_2O_3 испытывают значительно большие теплотери, чем образцы со стабилизированным ZrO_2 . Как результат, снижение

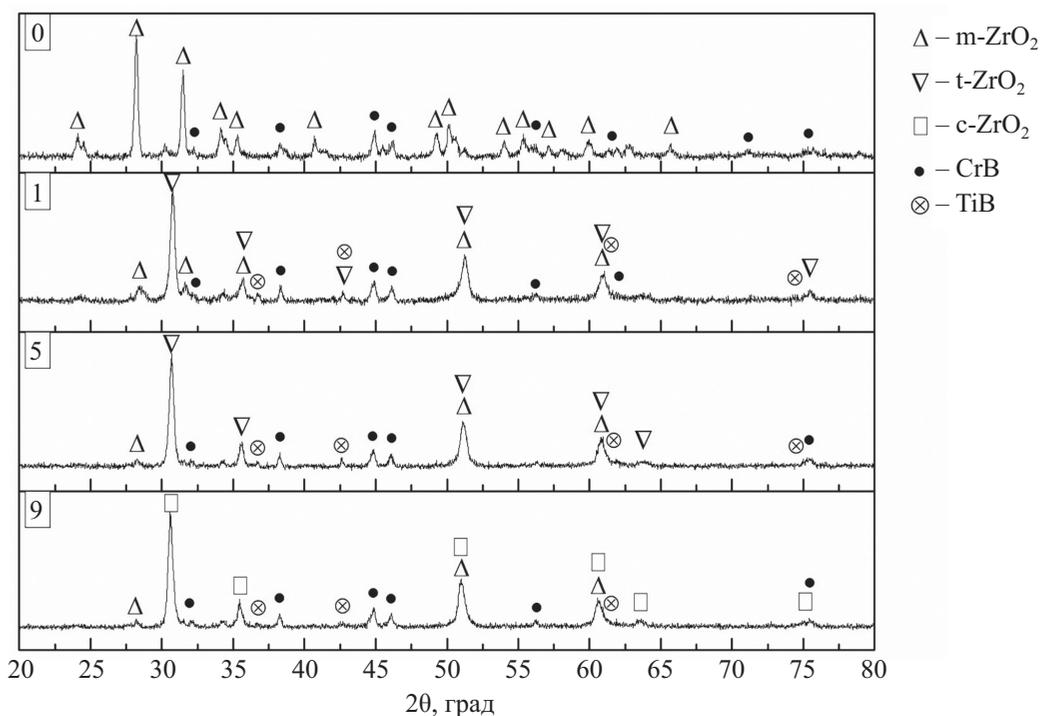


Рис. 3. Рентгенограммы образцов № 0, 1, 5, 9.

теплопотерь при протекании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза приводит к увеличению температуры и скорости горения.

Согласно результатам РФА (рис. 3), продукты синтеза выбранных объектов исследования представляли собой композиционные материалы и состояли из четырех фаз, а именно моноклинного оксида циркония, стабилизированной модификации ZrO_2 , борида хрома и борида титана (табл. 2). Поскольку процесс синтеза осуществлялся с использованием асбестовой изоляции, а также в кварцевом стакане, предотвращающем контакт получаемых материалов с воздухом, в продуктах не наблюдалось образование побочных фаз, таких как оксид и нитрид титана. При этом в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза исходной смеси без стабилизирующей добавки (образец № 0) было получено наибольшее количество моноклинной модификации ZrO_2 – 70 мас% (табл. 2). При увеличении содержания Y_2O_3 в исходной системе до 1 мас% в продуктах синтеза (образец № 1) наблюдалось резкое снижение количества моноклинной модификации и увеличение доли тетрагонального ZrO_2 . Максимальное содержание тетрагональной модификации достигается при содержании стабилизирующей добавки 4.8 мас% (образец № 5). При

увеличении доли Y_2O_3 в исходной смеси до 8.6 мас% в продуктах синтеза наблюдалась кубическая модификация оксида циркония. Формирование кубической модификации ZrO_2 происходит в результате того, что продукты синтеза образца № 9 формируются в условиях, соответствующих участку фазовой диаграммы ZrO_2 – Y_2O_3 (рис. 1а), на котором наблюдается однофазная область кубического ZrO_2 . Формирование продуктов синтеза состава № 9 происходит при температуре 1820°C и содержании Y_2O_3 9 мол% в соотношении $(100-x)ZrO_2/xY_2O_3$.

Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, введение стабилизирующей добавки в исходную систему оказывает влияние на микроструктуру продуктов синтеза. На рис. 4а и 4в приведены микрофотографии морфологии полученных порошков без Y_2O_3 и его содержанием 4.8 мас% (образцы № 0, 5). Как видно из данного рисунка, частицы синтезированного порошка образца № 0 имеют более рыхлую и губчатую морфологию, в то время как частицы порошка образца № 5 имеют оскольчатую морфологию. Кроме того, продукты синтеза без стабилизирующей добавки имеют более мелкий размер кристаллитов. Так, продукты синтеза образца № 0 имеют средний размер частиц ZrO_2 около 2 мкм (рис. 4б), в то время как в образце № 5 сред-

Таблица 2. Характеристики образцов № 0, 1, 5, 9.

№ образца	Фаза	Содержание, мас%	Сингония	Пространственная группа	ICDD PDF 2 card
0	ZrO_2	70	Моноклинная	$P21/a$	65-0687
	ZrO_2	4	Тетрагональная	$P42/nmc$	10-75-9646
	CrB	26	Ромбическая	$Cmcm$	32-0277
	TiB	–	Кубическая	$Fm-3m$	06-0641
1	ZrO_2	15	Моноклинная	$P21/a$	65-0687
	ZrO_2	48	Тетрагональная	$P42/nmc$	10-75-9646
	CrB	28	Ромбическая	$Cmcm$	32-0277
	TiB	9	Кубическая	$Fm-3m$	06-0641
5	ZrO_2	10	Моноклинная	$P21/a$	65-0687
	ZrO_2	54	Тетрагональная	$P42/nmc$	10-75-9646
	CrB	28	Ромбическая	$Cmcm$	32-0277
	TiB	8	Кубическая	$Fm-3m$	06-0641
9	ZrO_2	9	Моноклинная	$P21/a$	65-0687
	$Zr_{0.93759}Y_{0.0685}O_{1.969}$	55	Кубическая	$P21/a$	10-81-8287
	CrB	30	Ромбическая	$Cmcm$	32-0277
	TiB	6	Кубическая	$Fm-3m$	06-0641

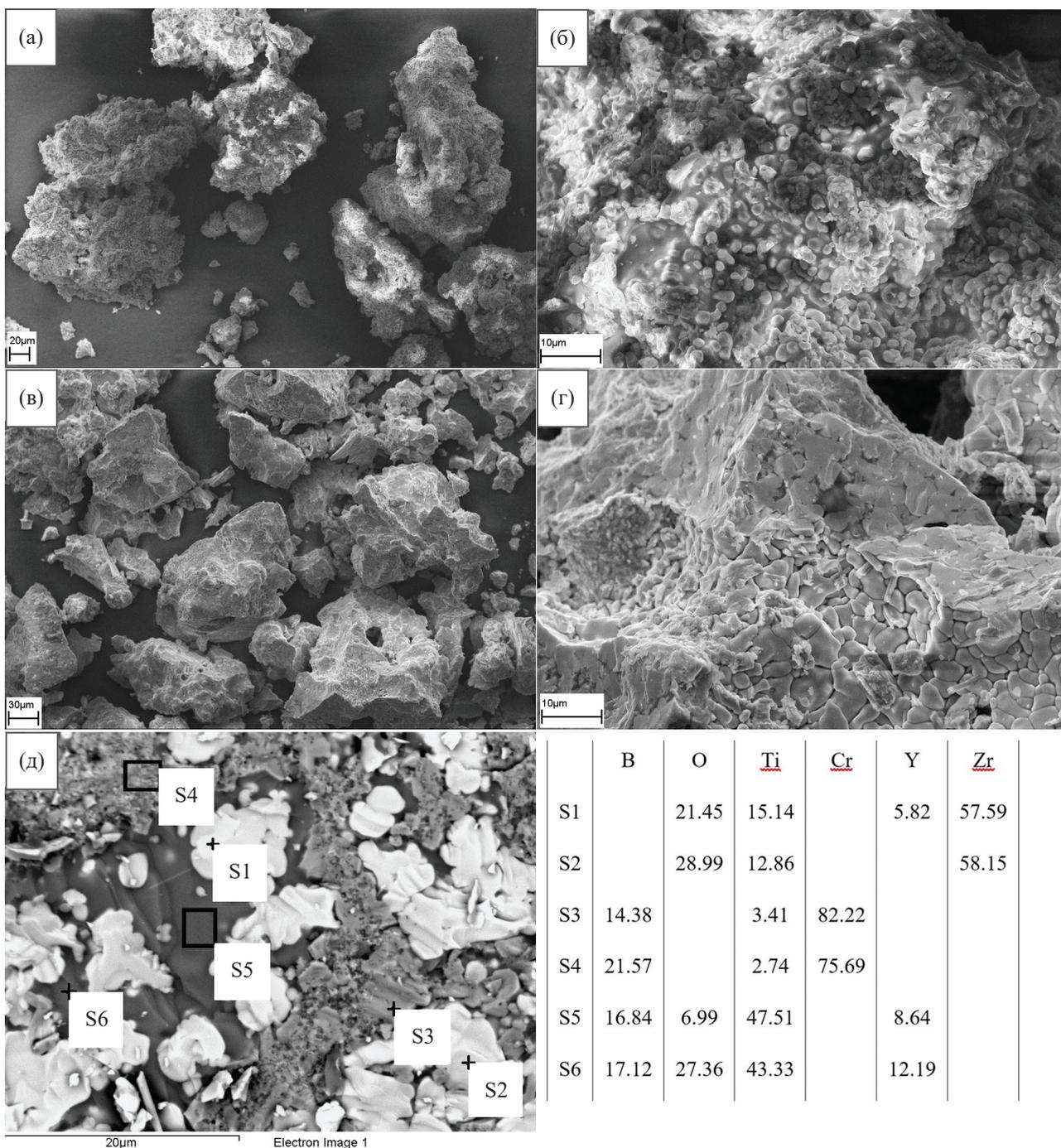


Рис. 4. Результаты СЭМ полученных композиционных материалов: (а), (в) – морфология порошков составов 0 и 5; (б), (г) – микроструктура порошков составов 0 и 5; (д) – микроструктура и результаты ЭДА-анализа образца 9. Результаты ЭДА приведены в мас%.

ний размер частиц оксида циркония составил около 5 мкм (рис. 4г). Поскольку увеличение содержания Y_2O_3 приводит к увеличению температуры горения синтезированных материалов, это приводит к более

глубокому протеканию процессов рекристаллизации и увеличению среднего размера частиц в продуктах синтеза. На рис. 4д приведена микрофотография структуры образца № 9, характерная для всех син-

тезированных материалов. Из рисунка видно, что синтезированные материалы имеют композиционную структуру. На данном рисунке светлые области (спектр S1 и S2) соответствуют агломератам частиц диоксида циркония, серые области (спектр S3 и S4) соответствуют бориду хрома и наиболее темные (спектр S5 и S6) – бориду титана.

ВЫВОДЫ

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены керамические композиционные материалы на основе исходной порошковой системы $\text{V}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3\text{--Zr--Ti--Y}_2\text{O}_3\text{--B}$. Изучено влияние стабилизирующей добавки оксида иттрия на процесс синтеза в указанной исходной системе в диапазоне концентраций Y_2O_3 от 0 до 8.6 мас%. Установлено, что увеличение содержания стабилизирующей добавки в исследуемых материалах приводит к монотонному повышению температуры горения от 1440 до 1820°C и скорости горения от 2.8 до 6.3 мм/с в изученном диапазоне содержания Y_2O_3 . Также установлено, что введение оксида иттрия в исходную систему снижает количество моноклинного ZrO_2 с 70 до 9 мас% и приводит к увеличению содержания тетрагональной модификации ZrO_2 с 4 до 54 мас% в изученном диапазоне содержания Y_2O_3 . Кроме того, введение 8.6 мас% Y_2O_3 в исходную систему приводит к формированию в продуктах синтеза кубического ZrO_2 . Согласно результатам СЭМ установлено, что введение стабилизирующей добавки приводит к увеличению размеров структурных составляющих за счет увеличения температуры горения материалов. Также установлено, что синтезированные материалы имели композиционную структуру, состоящую из оксида циркония, бориды титана и бориды хрома.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения композиционных материалов в настоящей работе в качестве исходных компонентов использовали порошки оксида бора (>99%, <2 мкм), оксида хрома ($\geq 99.9\%$, 1 мкм), циркония (>99%, <50 мкм), титана (<45 мкм, 99.1%), оксида иттрия (99.95%, <10 мкм) и бора (99.5%, 10 мкм). Получение материалов осуществляли методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Для синтеза использовали цилиндрические

порошковые заготовки с относительной плотностью 0.7, полученные методом холодного одноосного прессования.

Синтез материалов осуществляли в кварцевых стаканах с толщиной стенки 1 мм с использованием асбестовой бумаги для теплоизоляции и предотвращения контакта горячих продуктов синтеза с воздухом. Для получения порошковых заготовок указанные исходные компоненты предварительно выдерживали в сушильном шкафу при 50°C и смешивали в шаровой мельнице в течение 12 ч. Инициирование процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза осуществлялось вольфрамовой спиралью, диаметр сечения которой составил 1 мм, напряжение инициирования 25 В.

Для измерения характеристик горения синтезированных материалов использовали модульную измерительную систему QMBox с модулем QMS301, имеющую входную частоту 250 Гц. Термопары изготавливали из вольфрам-ренийевой проволоки ВР5-20. Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 с графитовым монохроматором на вторичном пучке (CuK_α -излучение). Регистрация дифрактограмм вели в режиме пошагового сканирования в интервале углов $2\theta = 20\text{--}80^\circ$ с шагом 0.025° и экспозицией 4 с в точке. Микроструктуру полученных материалов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием электронного микроскопа Carl Zeiss LEO 1450 VP.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чижиков Андрей Павлович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2793-6952>

Антипов Михаил Сергеевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7498-428X>

Константинов Александр Сергеевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0524-6283>

Бажин Павел Михайлович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1710-3965>

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10182, <https://rscf.ru/project/22-79-10182/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shojaie-bahaabad M., Bozorg M., Najafizadeh M., Cavaliere P.* // *Ceram. Int.* 2023. Vol. 50. P. 9937. doi 10.1016/j.ceramint.2023.12.372
2. *Malinina E.A., Myshletsov I.I., Buzanov G.A., Kubasov A.S., Kozerozhets I.V., Goeva L.V., Nikiforova S.E., Avdeeva V.V., Zhizhin K.Y., Kuznetsov N.T.* // *Molecules.* 2023. N 28. P. 453. doi 10.3390/molecules28010453
3. *Guria J.F., Bansal A., Kumar V.* // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021. Vol. 41. P. 1. doi 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.051
4. *Zhang W., Shi F., Wang J., Yang Y., Zhao G., Zhao D.* // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2024. Vol. 44. P. 2329. doi 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.007.
5. *Wang Y., Ye J., Li J., Song H., Ye L., Yue X., Ru H.* // *Ceram. Int.* 2024. Vol. 50. P. 1908. doi 10.1016/j.ceramint.2023.10.293
6. *Cao W., Zhou J., Ren C., Omran M., Gao L., Tang J., Zhang F., Chen G.* // *J. Mater. Res. Technol.* 2023. Vol. 26. P. 4563. doi 10.1016/j.jmrt.2023.08.183
7. *Авдеева В.В., Полякова И.Н., Вологжанина А.В., Гоева Л.В., Бузанов Г.А., Генералова Н.Б., Малинина Е.А., Жижин К.Ю., Кузнецов Н.Т.* // *ЖНХ.* 2016. Т. 61. С. 1182. doi 10.7868/S0044457X16090026; *Avdeeva V.V., Polyakova I.N., Vologzhanina A.V., Goeva L.V., Buzanov G.A., Generalova N.B., Malinina E.A., Zhizhin K.Yu., Kuznetsov N.T.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2016. Vol. 61. P. 1125. doi 10.1134/S0036023616090023
8. *Zhang K., Li S., Liu T., Xiong Z., Zhu Z., Zhang Y., Ullah A., Liao W.* // *Smart Mater. Manuf.* 2024. Vol. 2. Article no. 100048. doi 10.1016/j.smmf.2024.100048
9. *Fujii S., Shimazaki K., Kuwabara A.* // *Acta Mater.* 2024. Vol. 262. Article no. 119460. doi 10.1016/j.actamat.2023.119460
10. *Liang Z., Wang W., Zhang M., Wu F., Chen J.-F., Xue C., Zhao H.* // *Physica (B).* 2017. Vol. 511. P. 10. doi 10.1016/j.physb.2017.01.025.
11. *Mosavari M., Khajehhaghverdi A., Aghdam R.M.* // *Inorg. Chem. Commun.* 2023. Vol. 157. Article no. 111293. doi 10.1016/j.inoche.2023.111293
12. *Liu L., Wang S., Jiang G., Liu H., Yang J., Li Y.* // *Mater. Today Chem.* 2024. Vol. 35. Article no. 101902. doi 10.1016/j.mtchem.2024.101902
13. *Kozerozhets I.V., Panasyuk G.P., Azarova L.A., Belan V.N., Semenov E.A., Voroshilov I.L., Danchevskaya M.N.* // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. Vol. 55. P. 1126. doi 10.1134/S004057952106004X
14. *Chen G., Ling Y., Li Q., Zheng H., Li K., Jiang Q., Gao L., Omran M., Peng J., Chen J.* // *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46. P. 16842. doi 10.1016/j.ceramint.2020.03.261
15. *Cao W., Zhou J., Ren C., Omran M., Gao L., Tang J., Zhang F., Chen G.* // *J. Mater. Res. Technol.* 2023. Vol. 26. P. 4563. doi 10.1016/j.jmrt.2023.08.183
16. *Zu J.H., Gao Y., Liu D., Luo W.F., Feng Z., Bao Y., Shang Q.Y., Bai Y., Fan W., Wang Y., Yu F.L.* // *Ceram. Int.* 2024. Vol. 50. P. 20460. doi 10.1016/j.ceramint.2024.03.169
17. *Baqiah H., Kechik M.M.A., Pasupuleti J., Zhang N., Al-Hada N.M., Chau C.F., Li Q., Xu S.* // *Results Phys.* 2023. Vol. 55. 107194. doi 10.1016/j.rinp.2023.107194
18. *Díaz-Parralejo A., Maya-Retamar D., Calderón-Godoy M., Sánchez-González J., Ortiz A.J.* // *Ceram. Int.* 2023. Vol. 49. P. 19552. doi 10.1016/j.ceramint.2023.03.029
19. *Mohsen Q., Al-Gethami W.S., Zaki Z., Alotaibi S.H., Ibrahim M.M., Ezzat M., Amin M.M., Kamel M.M., Mostafa N.Y.* // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2022. Vol. 17. 22073. doi 10.20964/2022.07.24
20. *Козерожец И.В., Панасюк Г.П., Семенов Е.А., Ворошилов И.Л., Азарова Л.А., Белан В.Н.* // *Неорг. матер.* 2020. Т. 56. С. 755. doi 10.31857/S0002337X2007009X; *Kozerozhets I.V., Panasyuk G.P., Semenov E.A., Voroshilov I.L., Azarova L.A., Belan V.N.* // *Inorg. Mater.* 2020. Vol. 56. P. 716. doi 10.1134/S002016852007009
21. *Liu L., Wang S., Zhang B., Jiang G., Yang J.* // *J. Alloys Compd.* 2022. Vol. 898. Article no. 162878. doi 10.1016/j.jallcom.2021.162878
22. *Irankhah R., Mobasherpour I., Alizadeh M., Nezhad S.M.M., Nikzad L., Azar S.S.* // *Ceram. Int.* 2023. Vol. 49. P. 2681. doi 10.1016/j.ceramint.2022.09.248
23. *Katea S.N., Westin G.* // *Ceram. Int.* 2021. Vol. P. 10828. doi 10.1016/j.ceramint.2020.12.200.
24. *Shon I.J.* // *Ceram. Int.* 2016. Vol. 42. P. 13314. doi 10.1016/j.ceramint.2016.05.060
25. *Лапушин О.В., Болдырева Е.В., Болдырев В.В.* // *ЖНХ.* 2021. Т. 66. С. 402. doi 10.31857/S0044457X21030119; *Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. Vol. 66. P. 433. doi 10.1134/S0036023621030116
26. *Lu N., He G., Yang Z., Yang X., Li Y., Li J.* // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48. P. 7261. doi 10.1016/j.ceramint.2021.11.286
27. *Томилин О.Б., Мuryюмин Е.Е., Фадин М.В., Щипакин С.Ю.* // *ЖНХ.* 2022. Т. 67. С. 457. doi 10.31857/S0044457X22040195; *Tomilin O.B., Muryumin E.E., Fadin M.V., Shchipakin S.Yu* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. Vol. 67. P. 431. doi 10.1134/S0036023622040192
28. *Козерожец И.В., Панасюк Г.П., Семенов Е.А., Данчевская М.Н., Ивакин Ю.Д., Цветов Н.С.* // *Неорг. матер.* 2021. Т. 57. С. 621. doi 10.31857/S0002337X21060051; *Kozerozhets I.V., Panasyuk G.P., Semenov E.A., Danchevskaya M.N., Ivakin Yu.D.,*

- Tsvetov N.S.* // *Inorg. Mater.* 2021. Vol. 57. P. 592. doi 10.1134/S0020168521060054
29. *Bazhin P.M., Kostitsyna E.V., Chizhikov A.P., Konstantinov A.S., Neganov L.E., Stolín A.M.* // *J. Alloys Compd.* 2021. Vol. 856. 157576. doi 10.1016/j.jallcom.2020.157576
30. *Stolín A.M., Bazhin P.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Kostitsyna E.V., Vyckova M.Y.* // *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44. P. 13815. doi 10.1016/j.ceramint.2018.04.225
31. *Чижиков А.П., Константинов А.С., Бажин П.М.* // *ЖНХ.* 2021. Т. 66. С. 1002. doi 10.31857/S0044457X21080031; *Chizhikov A.P., Konstantinov A.S., Bazhin P.M.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. Vol. 66. P. 1115. doi 10.1134/S0036023621080039
32. *Stolín A.M., Бажин П.М., Алымов М.И.* // *Неорг. матер.* 2016. Т. 52. С. 672. doi 10.7868/S0002337X16060166; *Stolín A.M., Bazhin P.M., Alymov M.I.* // *Inorg. Mater.* 2016. Vol. 52. P. 618. doi 10.1134/S0020168516060169
33. *Bazhin P.M., Kovalev D.Yu., Luginina M.A., Averichev O.A.* // *Int. J. Self-Propagating High-Temp. Synth.* 2016. Vol. 25. P. 30. doi 10.3103/S1061386216010027
34. *Bazhin P., Chizhikov A., Stolín A., Antipov M., Konstantinov A.* // *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47. P. 28444. doi 10.1016/j.ceramint.2021.06.262
35. *Liu T., Zhang X., Wang X.* // *Ionics.* 2016. Vol. 22. P. 2249. doi 10.1007/s11581-016-1880-1
36. *Wang J., Wang Y., Lu X.* // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2023. Vol. 43. P. 5636. doi 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.05.020

Self-Propagating High Temperature Synthesis of Composite Material Based on Zirconium and Chromium Oxide

A. P. Chizhikov^{a,*}, M. S. Antipov^a, A. S. Konstantinov^a, A. O. Zhidovich^a, and P. M. Bazhin^a

^a *Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN), Chernogolovka, 142432 Russia*
*e-mail: chij@ism.ac.ru

Received April 23, 2024; revised May 24, 2024; accepted May 30, 2024

Ceramic composite materials based on stabilized zirconium oxide were obtained by self-propagating high-temperature synthesis. Yttrium oxide was used as a stabilizing additive. The work studied the effect of the content of yttrium oxide additive on the temperature and combustion rate of the materials studied. Also, based on the results of X-ray phase analysis and scanning electron microscopy, the effect of yttrium oxide on the phase composition and microstructure of the synthesized materials was studied.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, zirconium oxide, yttrium oxide, chromium boride, titanium boride