

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких порошковых материалов на основе диборида циркония из борсодержащего минерального сырья Республики Казахстан

²Батқал А.Н., ¹Темирланова Г.К.*,
¹Сатыбалдиев Е.М., ^{1,2}Сейдуалиева А.Ж.,
^{1,2}Абдулкаримова Р.Г.

¹Казахский национальный университет
им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
²Институт проблем горения,
Алматы, Казахстан
*E-mail: temyrlanova.gulnaz@gmail.com

Цель данной работы – синтез тугоплавких порошков диборида циркония в режиме горения. Одним из эффективных методов такого синтеза является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) с предварительной механической активацией (МА) исходных компонентов. Исходные компоненты СВ-синтеза: боратовая руда, циркон, порошковый алюминий и магний. После СВ-синтеза полученный продукт обрабатывали 37,5% HCl и промывали дистиллированной водой. Конечный состав и микроструктура СВС продуктов были исследованы методами рентгено-фазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Борсодержащие СВС-порошки могут использоваться в качестве биозащиты в ядерной технике, а также для производства абразивных порошков, керамических, композиционных материалов и покрытий.

Ключевые слова: диборид циркония; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; механическая активация.

Қазақстан Республикасының борқұрамды минералды шикізаттарынан цирконий дибориді негізінде қиынбалқитын ұнтақ материалдардың өздігінен таралатын жоғарытемпературалы синтезі

²Батқал А.Н., ¹Темирланова Г.К.*,
¹Сатыбалдиев Е.М., ^{1,2}Сейдуалиева А.Ж.,
^{1,2}Абдулкаримова Р.Г.

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
²Жану проблемалары институты,
Алматы, Қазақстан
*E-mail: temyrlanova.gulnaz@gmail.com

Бұл жұмыстың мақсаты – жану режимінде цирконий дибориді негізінде қиынбалқитын ұнтақтардың синтезі. Мұндай синтездің эффективті әдістерінің бірі – алдын ала механикалық активтеуден өткен бастапқы компоненттердің өздігінен таралатын жоғарытемпературалы синтезі (ӨЖС). ӨЖ-синтезінің бастапқы компоненттері: борат рудасы, циркон, ұнтақты алюминий мен магний. ӨЖ-синтезінен кейін алынған өнім 37,5% HCl ерітіндісімен өңделіп, дистилденген сумен шайылды. ӨЖС өнімінің соңғы құрамы мен микроқұрылымы рентгенфазалық талдау (РФАТ) және сканирлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістерімен зерттелді. Борқұрамды ӨЖС-ұнтақтары биоқорғаныс ретінде ядролы техникада, абразивті ұнтақтар, керамикалық, композитті материалдар алуда қолданыла алады.

Түйін сөздер: цирконий дибориді; өздігінен таралатын жоғарытемпературалы синтез; механикалық активтеу.

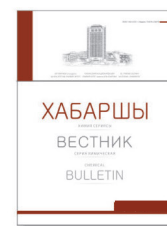
Self-propagating high-temperature synthesis of refractory powder materials based on zirconium diboride obtained from boron-containing mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan

²Batkal A.N., ¹Temirlanova G.K.*,
¹Satybaldiyev E.M., ^{1,2}Seydualieva A.Zh.,
^{1,2}Abdulkarimova R.G.

¹Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan
²Institute of Combustion Problems,
Almaty, Kazakhstan
*E-mail: temyrlanova.gulnaz@gmail.com

The goal of the present work is the synthesis of the refractory zirconium diboride powder in the combustion mode. One of the most effective methods of synthesis of the refractory zirconium diboride powder is the self-propagating high-temperature synthesis method (SHS) with a preliminary mechanical activation of the initial components. Initial components of the SH-synthesis are borate ore, zircon, aluminum powder and magnesium. After the SH-synthesis obtained products were processed by 37.5% HCl and were washed with distilled water. Final composition and microstructure of SHS products were investigated with X-ray phase analysis and SEM. Boron-containing SHS-powders can be used as bio-protection in nuclear engineering, production of abrasive powders, ceramic, composite materials and coatings.

Keywords: zirconium diboride; self-propagating high-temperature synthesis; mechanical activation.



Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких порошковых материалов на основе диборида циркония из борсодержащего минерального сырья Республики Казахстан

²Батқал А.Н., ¹Темирланова Г.К.*, ¹Сатыбалдиев Е.М., ^{1,2}Сейдуалиева А.Ж.,
^{1,2}Абдулкаримова Р.Г.

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

*E-mail: temyrlanova.gulnaz@gmail.com

1. Введение

Методы получения боридов подробно описаны и обсуждены многими исследователями, а предложенная классификация методов получения боридов, основанная на различных типах химического взаимодействия, существенно не изменилась. Основными являются синтез из элементов, метод, основанный на взаимодействии металлсодержащих и борсодержащих соединений металла и бора в присутствии водорода, электролиз расплавленных сред и др. [1-3]. Однако традиционные методы, кроме всего прочего, связаны с большими энергетическими затратами.

Одним из прогрессивных методов получения композиционных материалов, том числе боридсодержащих, является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Метод СВС относится к экстремальным технологиям получения материалов, позволяющим получать материалы с заданными свойствами, которые не представляется возможным получить традиционными методами. СВС – нетрадиционный технологический процесс получения материалов, основанный на проведении экзотермической химической реакции взаимодействия исходных реагентов в форме горения, отличающийся простотой и малой энергоемкостью. В настоящее время СВС сформировался как крупное технологическое направление, способное решать комплекс задач по получению химических продуктов заданного состава [4-8].

Развитие современной науки и техники тесно связано с разработкой и получением новых материалов, улучшением их свойств, снижением стоимости их промышленного производства, возможности их многократной утилизации и регенерации, особенно в условиях истощения не возобновляемых источников сырья. Поэтому с материаловедческими задачами тесно связаны проблемы разработки ресурсосберегающих процессов комплексной переработки минерального сырья, позволяющие получать целевой продукт в одну-две технологические операции [9]. При этом важнейшая задача – сокращение или замена сложных, энергоемких, экологически опасных процессов пирометаллургии и гидрометаллургии при обработке минерального сырья. Этой задаче в полной мере отвечает эффективный метод СВС получения высокодисперсных порошков тугоплавких соединений и объемных материалов, обеспечивающий безотходность производства, получение материалов заданной структуры и свойств [8-10].

В последнее время метод СВС используется наряду с механохимической активацией (МА), так называемый МА СВС. Механическая активация реагентов перед проведением СВС-процесса является очень важной стадией. С помощью МА можно существенно интенсифицировать гетерогенные процессы, МА приводит к увеличению химической активности обрабатываемых частиц за счет повышения их дефектности и/или увеличения реакционной поверхности (за счет уменьшения размеров частиц). Таким образом, МА подготавливает частицы к активному реагированию. Механическая активация может оказывать

влияние как на скорость и условия распространения фронта волны горения (макрокинетический эффект), так и на форму и размеры кристаллитов, на пористость структуры (структурный эффект) [10].

Наиболее эффективно на процессы СВС наноразмерных материалов (порошков) влияют механические воздействия. К ним относятся: предварительная механическая обработка шихты, механические воздействия на горящий образец и механическая обработка продуктов [5,11].

Процесс СВС является весьма перспективным и для получения наноматериалов: наноразмерных порошков, волокон и пленок, а также наноструктурных компактных материалов, что приобретает особое значение в наше время, которое называют временем начала третьей научно-технической революции – индустрии наносистем. Одно из важнейших направлений нанотехнологии в настоящее время – это получение наноразмерных порошков (нано-порошков). Изменение фундаментальных свойств традиционных материалов в нанодисперсном состоянии открывает широкий диапазон применения нанопорошков в области создания новейших материалов и технологий. Особый интерес к тугоплавким нанопорошкам связан с их применением в качестве исходного сырья при производстве керамических, магнитных и композиционных материалов, сверхпроводников, солнечных батарей, фильтров и др. [11-14].

Развитие производства и технологии соединений бора связано с открытием, освоением и промышленным использованием месторождений борсодержащего сырья. Создание новых материалов с различным комплексом свойств нового уровня качества на базе широко распространенного сырья, в том числе и техногенного, в настоящее время определяется задачами научно-технического прогресса. Одним из основных источников борных руд Казахстана являются месторождения элювиальных боратов Индерского соляного купола, уникальные в своем роде и не имеющие себе аналогов среди известных в мире месторождений бора. Эксплуатация Индерского месторождения ведется с середины прошлого столетия. Залежи элювиальных боратов разрабатываются карьерным способом и в настоящее время. Руды Индерского месторождения представлены в основном ашаритом, гидроборатитом и улекситом. Среднее содержание B_2O_3 в Индеровских рудах составляет 15-17%, сосредоточено в гипсовых шляпах, реже встречаются и более богатые руды (22,0-27,5%) [15]. Исследование условий получения, закономерностей горения и механизма образования тугоплавких порошков контролируемого состава в режиме СВС с использованием борсодержащего сырья имеет, безусловно, научное и практическое значение [15,16].

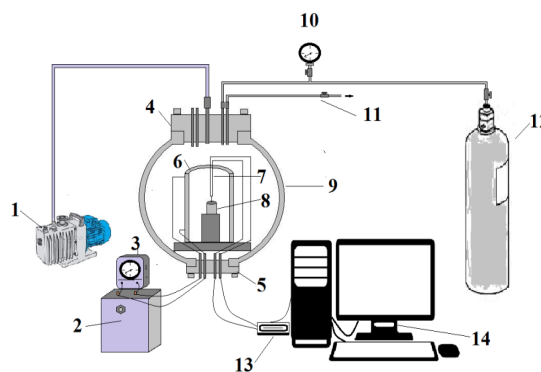
2. Эксперимент

Для получения тугоплавких порошковых материалов готовили образцы из шихты, которая содержит порошковый

силикат циркония (циркон Обуховского месторождения РК), оксид циркония, порошок магния, порошок алюминия, соляную кислоту (37,5%), обогащенную боратовую руду Индерского месторождения РК (содержание оксида бора до 40%).

Предварительную механическую активацию проводили в высокоэнергетической планетарно-центробежной мельнице Pulverisette 5 (Fritsch, Германия). Смеси готовили при стехиометрическом соотношении компонентов.

Для проведения СВ-синтеза с целью получения тугоплавких порошков боридов циркония были исследованы системы $ZrSiO_4$ -Al- B_2O_3 (руда) и ZrO_2 -Mg- B_2O_3 (руда). СВ-синтез в условиях высокого давления аргона проводился на исследовательской установке в реакторе высокого давления, представленной на рисунке 1. Установка обеспечивала давление аргона внутри реактора до 30 атм.



Обозначения: 1 – вакуумный насос, 2 – трансформатор, 3 – амперметр, 4 – верхняя крышка реактора, 5 – нижняя крышка реактора, 6 – трубчатая нагревательная печь, 7 – термopара, 8 – образец, 9 – корпус реактора, 10 – манометр, 11 – впускной и выпускной вентили, 12 – баллон с аргоном, 13 – блок системы сбора данных LTR-U-1, 14 – компьютер.

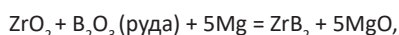
Рисунок 1 – СВС-реактор высокого давления

Приготовленные составы (шихта в насыпной массе) в стеклоглеродном тигле помещали в реактор, где при давлении аргона 10 атм проводили СВ-синтез борсодержащих тугоплавких порошков. Поджиг реакционной смеси в реакторе высокого давления осуществляли при помощи вольфрамовой спирали, через которую пропускался электрический ток. Температура образца после инициирования процесса горения фиксировалась с помощью компьютера и специального программного обеспечения, которое в реальном времени считывает данные с вольфрам-рениевых термopар BP5/20 с толщиной спая 200 мкм. После СВ-синтеза порошок выщелачивали соляной кислотой при нагревании и промывали дистиллированной водой.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводили на дифрактометре «ДРОН-4М» с использованием кобальтового K_{α} -излучения в интервале $2\theta=20^{\circ}-70^{\circ}$. Морфологию полученных образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе QUANTA 3D 200i (FEI, США).

3. Результаты и обсуждение

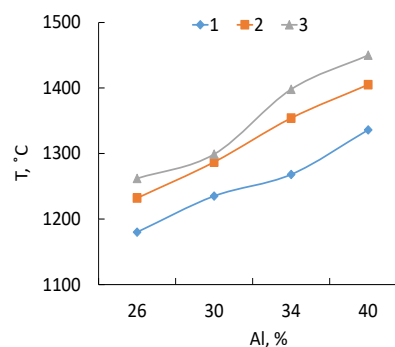
Самораспространяющийся высокотемпературный синтез проводили в системах $ZrO_2-B_2O_3$ (руда)-Mg и $ZrSiO_4-B_2O_3$ (руда)-Al по реакциям:



Для получения тугоплавких порошковых материалов количество циркона, магния, алюминия и боратовую руду меняли в ходе экспериментов и рассчитывали с учетом стехиометрии и возможности оптимизации содержания магния и алюминия в исходной смеси компонентов для увеличения реакционной способности в реакциях алюмотермического и магнийтермического горения. Исследованы закономерности горения в зависимости от содержания в составе шихты алюминия и магния (рисунки 2 и 3).

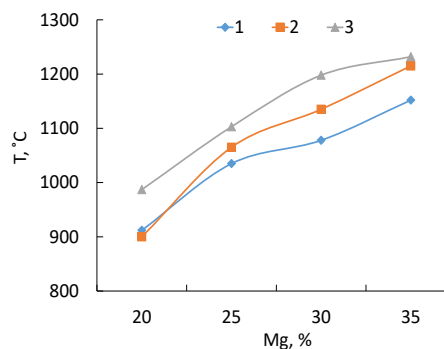
Из рисунка 2 видно, что на температуру горения влияет состав шихты, а именно, содержание алюминия и время предварительной МА шихты. С увеличением количества алюминия и времени МА температура СВС повышается. Из экспериментов установлено оптимальное содержание алюминия 30-40 масс. % в шихте. Ранее нами было изучено влияние давления аргона на параметры СВС-процесса, оптимальным установлено давление в реакторе 10 атм. Это обусловлено тем, что основное тепловыделение экзотермических составов происходит за счет алюмотермического или магнийтермического восстановления циркония. При проведении синтеза горением при давлении 5 атм наблюдали неполный синтез искомым целевых продуктов: магний и алюминий не в полной мере реагировали с исходными компонентами шихты. При увеличении давления выше 10 атм снижалась температура СВС. Известно, что с увеличением давления теплопроводность газа резко увеличивается, что приводит к увеличению теплотеря и снижению температуры в системе [17,18].

Использование металлического порошкового магния и алюминия в борсодержащих системах в качестве активного восстановителя позволяет достигать высоких температур в процессах технологического горения. Важным параметром СВС-систем, влияющим в итоге на качество синтезированного продукта, является температура горения. Как известно, в соответствии с эмпирическим критерием Мержанова, чтобы реакция прошла в режиме



Обозначения: 1 – без МА; 2 – МА 5 мин; 3 – МА 10 мин.

Рисунок 2 – Зависимость температуры горения системы $ZrSiO_4-B_2O_3-Al$ (Al 30%) в инертной среде от содержания алюминия и времени активации ($p = 10$ атм)



Обозначения: 1 – без МА; 2 – МА 5 мин; 3 – МА 10 мин.

Рисунок 3 – Зависимость температуры горения системы $ZrO_2-Mg-B_2O_3$ (Mg 31%) в инертной среде от содержания магния и времени активации ($p = 10$ атм)

горения при отсутствии предварительного подогрева, адиабатическая температура не должна быть меньше, чем $1200-1500^{\circ}C$ [4,7]. Ранее нами были проведены термодинамические расчеты адиабатической температуры горения ($T_{ад}$) и состава продуктов горения системы $ZrSiO_4-Mg-B_2O_3$ (руда) с помощью программы «Thermo», разработанной в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) Российской академии наук (Черноголовка) [19]. На практике обычно температуры горения, измеренные тем или иным методом, имеют значительно меньшие значения, чем расчетные. Это связано с тем, что в реальных условиях СВС-образцы имеют значительные тепло- и массообмен с окружающей средой. Кроме того, зачастую в СВС-системах присутствуют продукты синтеза, которые имеют фазовые переходы до $T_{ад}$. Обычно эти фазовые переходы происходят с затратой энергии, что является термостабилизирующим фактором для СВС-систем.

Высокая температура реакции обеспечивает синтез фаз, обладающих высокой температурой плавления, что позволяет применять полученные продукты реакции в огнеупорной промышленности. Из рисунка 3 следует, что температура СВ-синтеза для системы $ZrSiO_4$ - Mg - B_2O_3 (руда) составляет 1250-1300°C. Исследовано влияние состава шихты, времени предварительной механоактивации на температуру горения системы на примере системы ZrO_2 - Mg - B_2O_3 (руда). Из рисунка 3 видно, что с увеличением времени МА и количества магния повышается температура горения. Известно, что чем больше время предварительной МА, тем выше температура горения, следовательно, более полно проходят реакции в волне горения. Ускорение химической реакции при механической активации обусловлено «накачкой» в реагирующие вещества дополнительной (избыточной) энергии, которая

накапливается в образующихся структурных дефектах. Избыточная энергия уменьшает активационный барьер химической реакции [10,16].

В таблице 1 приведен фазовый состав продуктов СВС в среде аргона системы $ZrSiO_4$ - Al - B_2O_3 (руда) после обработки полученного СВС-продукта щелочью. Следует отметить, что обработка соляной кислотой в данной системе не дала результатов. Так как алюминий и его оксид являются амфотерными, для обработки образцов после СВС использовали щелочь NaOH, однако в продуктах СВС количество диборида циркония оказалось недостаточным.

В связи с тем, что при использовании силиката циркония в продуктах СВС определены примеси кремнийсодержащих соединений (таблица 1), нами была исследована система ZrO_2 - Mg - B_2O_3 (руда).

Таблица 1 – Продукты горения системы $ZrSiO_4$ - Al - B_2O_3 (руда) в инертной среде (10 атм)

Состав шихты	Время механохимической активации, мин	Продукты СВС, %							
		ZrB ₂	(Mg _{0,4} Al _{0,6})Al _{1,8} O ₄	CaS	Al	Si	Al ₂ O ₃	ZrSi	ZrSi ₂
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al30%)	-	15,4	40,8	5,3	8,1	0,8	22,3	3,4	3,9
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al40%)	-	19,7	22,5	4,2	9,2	0,9	36,4	3,5	3,6
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al30%)	5	10,4	31,7	4,4	10,3	1,1	33,2	5,5	3,4
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al40%)	5	17,2	31,5	3,5	7,9	1,3	29,7	5,6	3,3
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al30%)	10	13,9	27,9	5,5	6,5	1,4	32,5	8,2	4,1
ZrSiO ₄ -B ₂ O ₃ -Al(Al40%)	10	23,0	23,2	3,9	2,2	0,7	34,5	8,7	3,8

В таблице 2 приведены результаты рентгенофазового анализа продуктов СВС системы ZrO_2 - B_2O_3 - Mg в среде аргона после обработки конечных продуктов синтеза соляной кислотой при нагревании в течение 90 мин. Время предварительной МА шихты – 10 мин, давление в реакторе – 10 атм. Из таблицы 2 видно, что оптимальным является состав с 31 масс. % магния, при использовании предварительной МА шихты 10 мин выход диборида циркония высокий и с незначительной

примесью оксида магния (2,0%).

На рисунке 4 приведены микроструктура и результаты элементного анализа (SEM, EDAX) конечных продуктов СВС в виде порошка. Нитевидные кристаллы бориды циркония расположены в матрице оксида алюминия.

Микроструктура продуктов СВС системы Mg - B_2O_3 - ZrO_2 представлена наноразмерными и субмикронными нитевидными кристаллами бориды циркония в матрице оксида магния (рисунок 5).

Таблица 2 – Продукты СВС системы ZrO_2 - B_2O_3 - Mg в среде аргона (10 атм)

Содержание Mg в шихте ZrO_2 - B_2O_3 -nMg	Продукты СВС, %			
	ZrB ₂	ZrB	MgO	Zr _{0,904} Mg _{0,096} O _{1,904}
31%	94,7	3,3	2,0	-
38%	52,2	8,5	11,7	27,6
24%	31,3	4,7	22,6	41,4

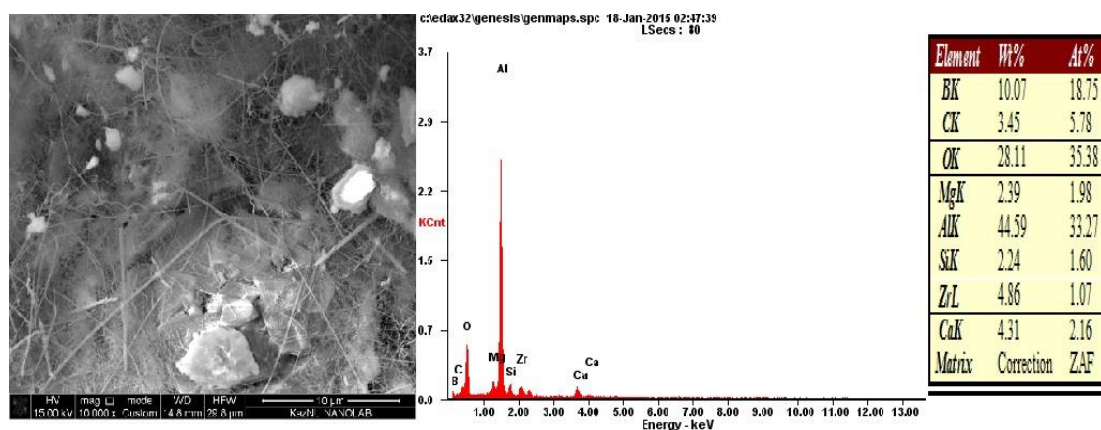


Рисунок 4 – Микроструктура продуктов CBC системы $ZrSiO_4-B_2O_3-Al$ (Al 30%) в инертной среде (10 атм)

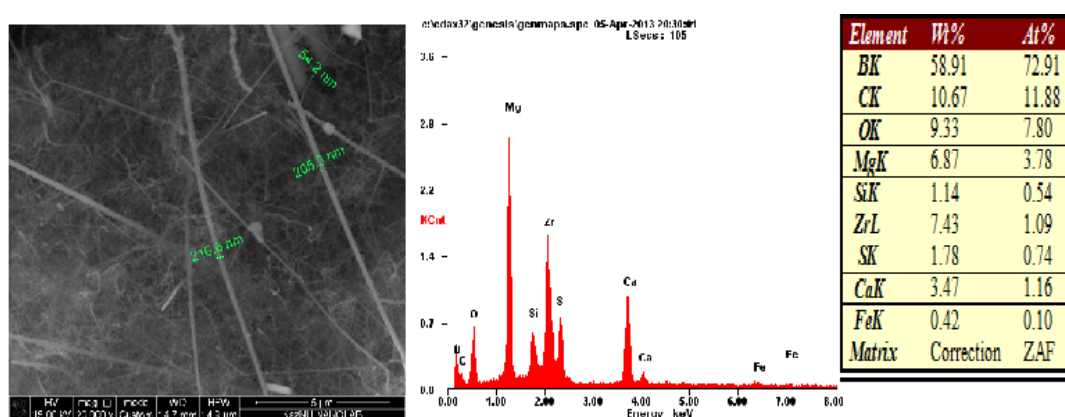


Рисунок 5 – Микроструктура CBC продуктов и элементный анализ системы $ZrO_2-Mg-B_2O_3$ (31% Mg) в инертной среде (10 атм)

4. Заключение

В результате проведенных методом CBC исследований получены порошковые тугоплавкие материалы на основе боридов циркония. Выполненные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

— Показана возможность использования боратовой руды Индерского месторождения РК в качестве борсодержащего компонента при получении тугоплавких порошков методом СВ-синтеза;

— Установлено, что использование магния в качестве восстановителя в исходной шихте для получения боридов циркония методом CBC предпочтительнее;

— Показано влияние предварительной механической активации исходных компонентов на температуру CBC, выход целевых продуктов и размеры синтезированных порошков;

— Установлено, что комплексное использование МА, CBC и последующая обработка полученного полупродукта CBC дает возможность получить субмикронные порошки

боридов циркония с фрагментами наноразмерных частиц только при использовании в качестве восстановителя магния и предварительной МА исходной шихты;

— Конечный фазовый состав полученных тугоплавких субмикронных и нанопорошков представлен целевым продуктом диборидом циркония (94,7%) и боридом циркония (3,3%) при использовании Mg в качестве восстановителя;

— Порошок тугоплавкого боридов циркония может применяться для производства абразивов, керамических, композиционных материалов и покрытий.

Благодарности

Работа была выполнена за счет грантового финансирования научных исследований Министерства образования и науки Республики Казахстан 3794/ГФ4 «Получение тугоплавких порошковых материалов из борсодержащего минерального сырья Республики Казахстан» (2015-2017 гг.).

Список литературы

- 1 Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
- 2 Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д., Трефилов В.И. Высокотемпературные бориды. – М.: Metallurgia, 1991. – 367 с.
- 3 Косолапова Т.Я. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. – М.: Metallurgia, 1986. – 928 с.
- 4 Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с.
- 5 Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимом Ю.М., Юхвид И.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. – М.: МИСиС, 2011. – 377 с.
- 6 Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология СВС-материалов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
- 7 Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2008. – Vol.17. – P.242-265.
- 8 Тавадзе Г.Ф., Штейнберг А.С. Получение специальных материалов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. – Тбилиси, 2011. – 206 с.
- 9 Ершова Т.Б., Верхотуров А.Д., Бутуханов В.Л., Бару Л.Л. Разработка и получение порошковых материалов с использованием вольфрамсодержащего минерального сырья // Перспективные материалы. – 2011. – №4. – С.86-90.
- 10 Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б., Шарафутдинов А.П., Баринова Б.Б., Ляхов Н.З. Твердофазный режим горения в механически активированных СВС-системах. Влияние продолжительности механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т.39, №1. – С.51-68.
- 11 Сычев А.Е., Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов // Успехи химии. – 2004. – Т.73, №2. – С.157-170.
- 12 He J., Wang W., Fu Zh., Sun H. Combustion synthesis of TiB₂ ceramics powder from B₂O₃-TiO₂-Mg system in air atmosphere // Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition. – 2005. – Vol.20, Is.2. – P.90-93.
- 13 Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А., Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов // Успехи химии. – 2009. – Т.78, №9. – С.867-888.
- 14 Андриевский Р.А. Наноструктурные дибориды титана, циркония и гафния: синтез, свойства, размерные эффекты и стабильность // Успехи химии. – 2015. – Т.84, №5. – С.540-554.
- 15 Дияров М.Д., Каличева Д.А., Мещеряков С.В. Природные богатства Индера и их использование. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 102 с.
- 16 Abdulkarimova R.G., Kamunur K., Baiseitov D.A., Fomenko S.M., Mansurov Z.A. The production of composition materials using boron containing mineral raw material // 18th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB2014), 31 August – 5 September 2014. – Honolulu, Hawaii, USA, 2014. – P.126.
- 17 Raimkhanova D.S., Fomenko S.M., Abdulkarimova R.G., Mansurov Z.A. Effect of argon pressure and aluminum content (in TiO₂-H₃BO₃-Al mix) on combustion and formation of chemical composition in combustion products // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol.746. – P.62-67.
- 18 Мансуров З.А., Фоменко С.М., Алипбаев А.Н., Абдулкаримова Р.Г., Зарко В.Е. Особенности алюмотермического горения систем на основе оксида хрома в условиях высокого давления азота // Физика горения и взрыва – 2016. – Т.52, №2. – С.1-10.
- 19 Айткалиева А.А., Сейдуалиева А.Ж., Абдулкаримова Р.Г. Получение композиционных материалов на основе ZrB₂-Al₂O₃ методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Химический журнал Казахстана. – 2016. – №2. – С.10-15.

References

- 1 Samsonov GV, Serebrykova TI, Neronov VA (1975) Borides [Boridy]. Atomizdat, Moscow, Russia. (In Russian)
- 2 Serebrykova TI, Neronov VA, Peshev PD, Trefilov VI (1991) High-temperature borides [Vysokotemperaturnyye boridy]. Metallurgy, Moscow, Russia. (In Russian)
- 3 Kosolapova TY (1986) Properties, preparation and application of refractory compounds [Svoystva polucheniye i primeneniye tugoplavkikh soyedineniy]. Metallurgy, Moscow, Russia. (In Russian)
- 4 Merzhanov AG, Mukasyan AS (2007) Solid flame combustion [Tverdoplammenoye gorenije]. TORUS PRESS, Moscow, Russia. (In Russian)
- 5 Levashov EA, Rogachev AS, Kurbatkina VV, Maxim YuM, Yukhvid II (2011) Promising materials and technologies of self-propagating high-temperature synthesis [Perspektivnyye materialy i tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza]. MISIS, Moscow, Russia. (In Russian)
- 6 Amosov AP, Borovinskaya IP, Merzhanov AG (2007) Powder technology of SHS-materials [Poroshkovaya tekhnologiya SVS-

materialov]. Mashinostroenie-1, Moscow, Russia. (In Russian)

7 Merzhanov AG, Borovinskaya IP (2008) International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis 17:242-265. <http://doi.org/10.3103/S1061386208040079>

8 Tavazde GF, Shteinberg AC (2011) Production of special materials by methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis [Poluchenie spetsialnykh materialov metodami samopacpproctpanyayushchego vysokotemperaturnogo sinteza]. Tbilisi, Russia. (In Russian)

9 Ershova TB, Verkhoturov AD, Butukhanov VL, Baru LL (2011) Perspective materials [Perspektivnyye materialy] 4:86-90. (In Russian)

10 Korchagin MA, Grigorieva TF, Bohonov BB, Sharafutdinov AP, Barinova BB, Lyakhov NZ (2003) Combustion, Explosion and Shock Waves 39:43-50. <https://doi.org/10.1023/A:1022145201911>

11 Sychev AE, Merzhanov AG (2004) Russ Chem Rev 73:147-159. <http://doi.org/10.1070/RC2004v073n02ABEH000837>

12 He J., Wang W, Fu Zh and Sun H (2005) J Wuhan Univ Technol 20:90-93. <http://doi.org/10.1007/BF02838499>

13 Tretiakov YD, Gudilin EA (2009) Russ Chem Rev 78:801-820. <https://doi.org/10.1070/RC2009v078n09ABEH004029>

14 Andrievsky RA (2015) (2004) Russ Chem Rev 84:540-554. <https://doi.org/10.1070/RCR4469>

15 Diyarov MD, Kalicheva DA, Meshcheryakov SV (1981) Inder's natural wealth and use [Prirodnnye bogatstva Indera i ikh ispolzovaniye]. Science, Almaty, Kazakhstan. (In Russian)

16 Abdulkarimova RG, Kamunur K, Baiseitov DA, Fomenko SM, Mansurov ZA (2014) The production of composition materials using boron containing mineral raw material. Abstracts of 18th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB2014). Honolulu, Hawaii, USA. P.126.

17 Raimkhanova DS, Fomenko SM, Abdulkarimova RG, Mansurov ZA (2013) Adv Mat Res 746:62-67. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.746.62>

18 Mansurov ZA, Fomenko SM, Alipbaev AN, Abdulkarimova RG, Zarko VE (2016) Combustion, Explosion, and Shock Waves [Fizika goreniya i vzryva] 52:1-10. (In Russian). <http://doi.org/10.15372/FGV20160208>

19 Aytkaalieva AA, Seydualieva A Zh, Abdulkarimova RG (2016) Chemical Journal of Kazakhstan [Khimicheskiy zhurnal Kazakhstana] 2:10-15. (In Russian)